

# **Hardwareimplementierte latenzarme drahtlose Medienzugriffsprotokolle für höchsten Datendurchsatz**

Von der Fakultät für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik  
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Informatiker

Marcus Ehrig

geboren am 2. Juni 1973 in Wernigerode/Harz

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rolf Kraemer

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Nolte

Gutachter: Prof. Dr. Bettina Schnor (Universität Potsdam)

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Dezember 2014



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Einführung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Problemstellung . . . . .	2
1.3. Lösungsansätze und wissenschaftlicher Beitrag . . . . .	5
1.4. Relevante Publikationen . . . . .	6
1.5. Aufbau der Dissertation . . . . .	7
<b>2. Drahtlose Datenübertragung</b>	<b>9</b>
2.1. Blockschema eines drahtlosen Nachrichtenkommunikationssystems . . . . .	9
2.2. Referenzmodelle . . . . .	11
2.2.1. OSI-Referenzmodell . . . . .	11
2.2.2. Referenzmodell für die Telekommunikation . . . . .	12
2.2.3. IEEE 802.11 Referenzmodell . . . . .	12
2.3. Modulationsverfahren . . . . .	13
2.4. Fehlerkorrekturverfahren . . . . .	14
2.5. Leistungsübertragungsbilanz (Link budget) . . . . .	15
2.6. Kommunikationsszenarien . . . . .	17
2.7. Multiplexverfahren . . . . .	18
2.7.1. Raummultiplex - Space/Spatial Division Multiplex . . . . .	18
2.7.2. Frequenzmultiplex - Frequency Division Multiplex . . . . .	18
2.7.3. Zeitmultiplex - Time Division Multiplex . . . . .	18
2.7.4. Codemultiplex - Code Division Multiplex . . . . .	18
2.8. Duplexverfahren . . . . .	18
2.9. Zusammenfassung . . . . .	19
<b>3. Medienzugriffsprotokolle für drahtlose Netzwerke im 60-GHz-Band</b>	<b>23</b>
3.1. Vermittlungsschicht - Network layer . . . . .	23
3.1.1. Dienstgüte - Quality of Service . . . . .	24
3.1.2. Traffic-Shaping (Verkehrsformung) . . . . .	25
3.1.3. Packet Scheduler (Paketplaner) . . . . .	26
3.2. Datensicherungsschicht - Data Link Layer . . . . .	27
3.2.1. Logische Verbindungssteuerung - Logical Link Control . . . . .	27
3.2.2. Fehlererkennung . . . . .	28
3.2.3. Vorwärtsfehlerkorrektur . . . . .	28
3.2.4. Rückwärtsfehlerkorrektur . . . . .	28
3.2.5. Datenflusssteuerung . . . . .	29
3.2.6. Anpassung der Paketgrößen . . . . .	30
3.3. Medienzugriffssteuerung - Medium Access Control (MAC) . . . . .	30
3.3.1. Medienzugriffsverfahren . . . . .	30
3.3.2. Einsatz gerichteter Antennen (Beamforming und Beamsteering) . . . . .	34
3.4. Standardisierung im 60-GHz-Band . . . . .	36
3.4.1. IEEE 802.11 - dritte Erweiterung „ad“ . . . . .	37
3.4.2. IEEE 802.15.3 - zweite Erweiterung „c“ . . . . .	40

3.4.3.	ECMA-387 . . . . .	41
3.4.4.	WirelessHD . . . . .	43
3.5.	Datensicherheit (Security) . . . . .	44
3.6.	Allgemeines MAC-Modell mit Anwendungsschnittstelle . . . . .	45
3.7.	Zusammenfassung . . . . .	47
<b>4.</b>	<b>Verfahren zur Steigerung der Effizienz</b>	<b>49</b>
4.1.	Overhead in der PHY-Schicht . . . . .	51
4.2.	Overhead in der MAC-Schicht . . . . .	51
4.3.	Steigerung des Datendurchsatzes und der Effizienz . . . . .	52
4.3.1.	Auswirkungen auf den Datendurchsatz im gestörten Kanal . . . . .	55
4.3.2.	Berechnungen für ein reales Kommunikationssystem . . . . .	57
4.4.	Wechselbeziehungen zwischen der PHY- und der MAC-Schicht (Cross-Layer Design) . . . . .	59
4.4.1.	Reduzierung der Verarbeitungszeit/-latenz . . . . .	60
4.4.2.	Reduzierung der Übertragungszeit . . . . .	61
4.5.	Zusammenfassung . . . . .	61
<b>5.</b>	<b>Hardwareimplementierbares MAC-Protokoll für drahtlose Hochgeschwindigkeits-</b> <b>datenübertragung</b>	<b>63</b>
5.1.	Einsatzszenarien und bekannte Implementierungen . . . . .	63
5.1.1.	Punkt-zu-Punkt-Verbindung . . . . .	64
5.1.2.	Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindung . . . . .	65
5.2.	Komponenten des Kommunikationssystems . . . . .	66
5.3.	Funktionen der Vermittlungsschicht . . . . .	66
5.3.1.	Steuerung der Abstrahlcharakteristik gerichteter Antennen . . . . .	68
5.3.2.	Nachbarschaftssuche . . . . .	69
5.3.3.	Slotbasierte Strahlkonfigurationsvorschrift . . . . .	75
5.3.4.	Alternative Strahlkonfigurationsvorschriften bei Verbindungsblockie- rung . . . . .	77
5.3.5.	Wegsuche (Routing) . . . . .	78
5.4.	Funktionen der Datensicherungsschicht . . . . .	79
5.4.1.	Datenflusskontrolle . . . . .	79
5.4.2.	Vergabe von Sequenznummern . . . . .	79
5.4.3.	Duplizierung von Paketen für Broadcast-Anwendungen . . . . .	80
5.4.4.	Fragmentierung von Paketen . . . . .	80
5.4.5.	Aggregation von Paketen . . . . .	81
5.4.6.	Unterstützung von Dienstgüteeigenschaften (QoS) . . . . .	81
5.4.7.	Fehlererkennung und -korrektur mit selektivem ARQ von Knoten zu Knoten . . . . .	82
5.4.8.	Direktionaler Medienzugriff mittels TDMA und Polling . . . . .	83
5.5.	Funktionen der Bitübertragungsschicht (PHY) . . . . .	88
5.5.1.	Digitale Basisbandverarbeitung . . . . .	88
5.5.2.	RSSI . . . . .	88
5.5.3.	Anwendungsschnittstelle für den Zugriff auf das Übertragungsmedium	88
5.6.	Protokollsteuerung und Datenpaketformat . . . . .	89
5.6.1.	Fehlerbehandlung . . . . .	90
5.6.2.	Latenz und Round Trip Time (RTT) . . . . .	90
5.6.3.	MPDU und Paketformate . . . . .	91
5.6.4.	Erhöhung der Robustheit . . . . .	92

5.6.5. Bestätigungen (Block-ACK) . . . . .	93
5.7. Schnittstellen zu höheren Schichten . . . . .	93
5.8. Zusammenfassung . . . . .	94
<b>6. Modellierung und Simulation</b>	<b>97</b>
6.1. Modellierung der Bitübertragungsschicht . . . . .	97
6.1.1. Richtantenne mit Beamsteering-Funktionalität . . . . .	97
6.1.2. Kanaleigenschaften . . . . .	98
6.1.3. Zeitverhalten der Komponenten . . . . .	99
6.2. Modellierung der Datensicherungsschicht . . . . .	99
6.3. Szenarien . . . . .	100
6.4. Generierung des Netzwerkverkehrs . . . . .	100
6.5. Modellierung der Vermittlungsschicht . . . . .	101
6.5.1. Routing . . . . .	101
6.5.2. Nachbarschaftssuche . . . . .	102
6.6. Resultierende Rohdaten eines Simulationsdurchlaufs . . . . .	102
6.7. Simulationsergebnisse . . . . .	102
6.8. Zusammenfassung . . . . .	103
<b>7. Hardwareintegrationsaspekte</b>	<b>107</b>
7.1. Gigabit-Demonstrator als Kabelersatzlösung mit redundanter Verbindung .	107
7.1.1. MAC-Architektur . . . . .	107
7.1.2. MAC-Performanz . . . . .	108
7.1.3. System-Performanz . . . . .	109
7.1.4. FPGA-Integration und Ressourcenverbrauch . . . . .	109
7.2. Multi-Gigabit-Demonstrator als Kabelersatzlösung für eine Punkt-zu-Punkt- Verbindung . . . . .	110
7.2.1. MAC-Architektur . . . . .	110
7.2.2. Messung der Paketfehlerraten des Kommunikationssystems . . . . .	111
7.2.3. Messung der MAC-Performanz mit einer HD-Industriekamera . . . . .	112
7.2.4. Anwendungsschnittstelle für den direkten und exklusiven Zugriff auf den Übertragungskanal . . . . .	113
7.3. Evaluation der Hardwareumsetzungen . . . . .	115
7.3.1. Synchronisierung der Stationen . . . . .	115
7.3.2. Implementierung der Sequenznummernverwaltung mit gleitenden Fens- tern . . . . .	116
7.3.3. Paketpuffer . . . . .	117
7.3.4. MAC-Steuerautomat . . . . .	118
7.3.5. MAC-Lookup im Ethernet-Switch . . . . .	119
7.4. Komponenten des neuen Punkt-zu-Mehrpunkt MAC-Protokolls . . . . .	119
7.4.1. Ethernet-Switch . . . . .	120
7.4.2. Sendepfad . . . . .	124
7.4.3. Empfangspfad . . . . .	133
7.4.4. Steuereinheit . . . . .	134
7.4.5. PHY Layer Convergence Protocol . . . . .	136
7.5. Zusammenfassung . . . . .	136
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>139</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>142</b>

## *Inhaltsverzeichnis*

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>143</b>
<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>144</b>
<b>Literatur</b>	<b>147</b>
<b>A. Bilder, Tabellen und Algorithmen</b>	<b>153</b>
<b>B. Berechnungen und Simulationsergebnisse</b>	<b>161</b>
<b>C. Meßergebnisse</b>	<b>171</b>

## Kurzfassung

Der Fortschritt der Technik ermöglicht immer leistungsfähigere drahtlose Dienste mit hohen Anforderungen an Latenz, Jitter und Übertragungsgeschwindigkeit. Aktuelle digitale Protokolle für drahtgebundene hochauflösende Multimediaübertragungen (HDMI, DisplayPort) oder Peripherieschnittstellen (USB, PCIe, SATA) in der Computertechnik erreichen Datenraten im Multi-Gigabit Bereich. Die Übertragung der Inhalte z.B. Filme, Musikstreaming oder Dateiübertragungen mit Hilfe breitbandiger drahtloser Übertragungsverfahren vereinfacht die kabellose „Installation“ und die daraus folgende Benutzerfreundlichkeit (Mobilität) im Heimbereich (Indoor). Weiterhin werden Systeme mit hohen Datenraten und kleinen Latenzen unter 5 ms im Mobilfunkbereich benötigt, um Basisstationen (3G, LTE) mit dem Kernnetzwerk zu verbinden. Diese Backhaul-Verbindungen können auch im innerstädtischen Bereich zum Aufbau von Small-Cell-Installationen genutzt werden, da nicht immer eine Kabelverlegung möglich ist. Eine Verkettung der Verbindungen vergrößert den Abstand zum Zugangspunkt des Kernnetzes und stellt zusätzliche Anschlußpunkte für Basisstationen bereit. Allerdings vergrößert sich auch die Latenz für die weiter entfernten Stationen.

In dieser Arbeit wird ein MAC-Protokoll für hochratige und latenzarme drahtlose Verbindungen vorgestellt. Dazu werden sowohl Punkt-zu-Punkt- als auch Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen auf ihre speziellen Anforderungen bei der Implementierung der MAC-Komponenten in einer programmierbaren Hardware (FPGA) analysiert. Eine Integration des MAC-Protokolls zusammen mit einem OFDM-Basisbandprozessor mit Brutto-Datenraten größer 5 GBit/s erlaubt die Überprüfung der Funktionalität sowie die Messung wichtiger Protokollparameter unter realen Einsatzbedingungen. Das vorgeschlagene Medienzugriffsprotokoll unterstützt den Einsatz von Beamsteering-Verfahren zur Suche von benachbarten Kommunikationsteilnehmern und den gleichzeitigen räumlich getrennten Kanalzugriff mehrerer Kommunikationsteilnehmer. Eine Anwendungsschnittstelle für nutzerspezifische Implementierungen mit exklusivem Zugriff auf das Übertragungsmedium erleichtert die Integration zusätzlicher Funktionalität wie z.B. eine hochauflösende Entfernungsmessung. Weiterhin wird ein Verfahren zur latenzarmen Detektierung und Umschaltung blockierter Pfade vorgestellt. Umfangreiche Simulationen bestätigen die Funktionalität des MAC-Protokolls in unterschiedlichen Szenarien mit und ohne Übertragungsfehler.

## Abstract

The progress in the technology leads to higher performance of wireless services with high requirements in latency, jitter, and data rates. Current digital protocols for wired high definition multimedia transmissions (HDMI, Display Port) or peripheral interfaces (USB, PCIe, SATA) reach data rates in the order of several gigabits per second. The transmission of the content, e.g., movie and music streaming, or file transfers with broadband wireless transmission techniques allows more easy setup procedures and results in better usability in indoor environments. The infrastructure for mobile services requires transmission systems with high data rates and low latencies of below 5 ms for connecting mobile base stations to the core network. These connections can also be used for building up small-cells in the inner cities, because in some cases there are no wired connections possible. The daisy-chaining of the connections increases the distance between the core network and provides additional access points for the mobile base stations. However, the latency is increasing for stations with higher distance between them.

This work presents a MAC protocol for high data rate and low latency connections. Therefore, the requirements for the integration of the components of the MAC protocol in a programmable hardware (FPGA) are analyzed for point-to-point and point-to-multi-point connections. The integration of the MAC protocol together with an OFDM baseband processor with gross data rates of about 5 GBit/s allows the test of the functionality and the measurement of important parameters of the protocol under real operational conditions. The proposed MAC protocol supports the use of beamsteering methods for searching of stations in the neighborhood and allows simultaneous space division access of stations. Additionally, a method for low latency detection and switching of blocked connections is presented. An application interface for user-defined implementations can assign exclusive access to the transfer medium. This facilitates the integration of additional functionality, e.g., high definition measurements of distances (ranging). Exhaustive simulations confirm the functionality of the MAC protocol in different scenarios with and without transmission errors.



# 1. Einführung

## 1.1. Motivation

Leistungsfähige drahtlose Übertragungsverfahren erweitern die Einsatzgebiete von Anwendungen mit hohem Datendurchsatz im stationären sowie im mobilen Bereich. Darunter fallen z.B. Videostreamingdienste, soziale Netzwerke und ausgelagerte Datenspeicher mit moderaten Datenraten von einigen MBit/s, aber auch drahtlose Protokolle für den Kabelersatz im Multimedia- und PC-Bereich mit ultra-hohen Datenraten von mehreren GBit/s.

Die mobilen Dienste sind überall dort nutzbar, wo ein Internetzugang verfügbar ist. Tragbare Geräte, wie Smartphones und Tablet-PCs, erfordern eine permanente Datenverbindung für den Zugriff auf diese Datendienste. Je nach Einsatzort stehen verschiedene drahtlose Zugänge zur Verfügung. In der Wohnung wird der Zugang zum Internetprovider über einen Festnetzanschluß (DSL, FTTH) hergestellt. Ein WLAN-Accesspoint (Router) stellt einen drahtlosen Netzwerkzugang für mobile Geräte bereit. In Gebieten ohne Festnetzanschluß stehen Mobilfunkverfahren (UMTS, LTE) oder Satellitenverbindungen zur Verfügung. Außerhalb des Wohnbereichs wird die Internetverbindung über Mobilfunkbetreiber (UMTS, LTE) oder freie WLAN-Netzwerke bereitgestellt. Der nahtlose Übergang vom Innen- zum Außenbereich stellt die Mobilfunkprovider vor die Herausforderung, ihre Netzwerkinfrastruktur entsprechend zu erweitern.

Sehr hohe Datenraten von mehreren GBit/s werden auch für Kabelersatzlösungen im vorwiegend stationären Betrieb benötigt. Aktuelle drahtgebundene Schnittstellen für PC-Komponenten wie USB oder PCIe sowie digitale Displayverbindungen wie DP oder HDMI können heutzutage drahtlos ohne Installationsaufwand eingesetzt werden. Im Bereich des Rechenzentrumsbetriebs wird überlegt, die Backbone-Verbindungen zwischen den Servern ( $>10$  GBit/s) auch drahtlos herzustellen.

Die Datenübertragung wird über ein Medienzugriffsprotokoll gesteuert. Dieses koordiniert den Zugriff aller Geräte auf das Medium/Kanal und stellt die korrekte Zustellung der Daten sicher. Der verfügbare Datendurchsatz ist abhängig von den Eigenschaften des Übertragungskanals, den analogen und digitalen Übertragungsverfahren sowie den Medienzugriffsprotokollen.

Im Folgenden werden einige Anwendungsszenarien mit jeweils unterschiedlichen Anforderungen an das Übertragungsprotokoll vorgestellt.

**Büroszenario** Das Büroszenario besteht aus drahtlosen Zugriffspunkten (Wireless Access Points) mit Mehrantennentechnik (MIMO), die hauptsächlich mobile Geräte wie tragbare Rechner (Laptop) oder Multimediageräte versorgen. Anwendungen für Dateiübertragungen und serverbasierte Abfragen (HTML) erfordern moderate Datenraten für die Übertragung der Daten und stellen keine besonderen Anforderungen an die Latenz. Anwendungen für Sprach- und Videoübertragungen (Echtzeit) muß hingegen die höchste Priorität (siehe QoS) eingeräumt werden. Die Entfernung zwischen den Stationen beträgt deutlich unter 100 m.

**Gerätesynchronisierung bzw. Kioskszenario** Die Synchronisierung externer Festplatten sowie mobiler Geräte wie Smartphones oder Tablet-PCs mit einem Rechner fällt in diese Kategorie. Dazu sind große Datenmengen in möglichst kurzer Zeit zwischen zwei Geräten zu übertragen. Im Kioskszenario wird zum Beispiel ein erworbener Film auf den Speicher des Käufers übertragen. Der Abstand der Geräte ist mit einem bis zwei Meter sehr klein.

## 1. Einführung

**Drahtlose Anzeigen (Wireless Displays) bzw. Kabelersatz** Die Steigerung der Übertragungsraten aktueller drahtloser Breitbandübertragungsverfahren erlaubt den Umstieg von drahtgebundenen (Multimedia-)Übertragungsprotokollen auf das drahtlose Medium. Das vereinfacht den Installationsaufwand der Verkabelung in Geräten sowie im Wohnraum, stellt aber hohe Anforderungen an die Datenrate und die Latenz. Die Aktualisierung der Bildschirmanzeige als Ergebnis von Nutzerinteraktionen erfordert besonders niedrige Latenzen, um einen hohen Bedienkomfort zu gewährleisten. Der Abstand der Geräte beträgt bis zu 10 m.

**Backhaul (Punkt-zu-Punkt bzw. Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen im Small-Cell-Szenario)** Die Nutzung von Multimediadiensten auf Mobilgeräten (Smartphones) benötigt eine hochratige Anbindung der Mobilfunkbasisstationen an das Kernnetz. Je mehr Nutzer sich in einer Funkzelle befinden z.B. in Einkaufsstraßen oder Stadien, desto geringer ist die verfügbare Datenrate pro Nutzer. Um die Anzahl der Nutzer pro Funkzelle zu verringern, muß die Zellengröße und somit die Reichweite verkleinert werden. Das geschieht durch eine Erhöhung der Anzahl der Antennensektoren pro Basisstation oder durch den Einsatz zusätzlicher Basisstationen (Small-Cell Szenario). Die Basisstationen werden über sogenannte Backhaul-Verbindungen (Richtfunkstrecken) mit dem Zugangspunkt des Kernnetzes verbunden. Eine Verkettung der Backhaul-Verbindungen vergrößert den Abstand zum Kernnetz und stellt zusätzliche Zugangspunkte für Basisstationen bereit. Die Latenz der übertragenen Daten erhöht sich mit der Anzahl der Verkettungen und ist eine wichtige Kenngröße für die Gewährleistung der Funktionalität der Netzdienste (Telefonie und Daten). Backhaul-Verbindungen können mehrere Kilometer überbrücken. Im vorgestellten Straßenzugszenario beträgt der Abstand mehrere hundert Meter.

**Drahtloses Entertainment im Flugzeug** Die Flugzeugbauer setzen alles daran, das Gewicht der eingebauten Komponenten zu reduzieren. Dazu zählen auch die kilometerlangen Kabelstränge. Ziel ist es, z.B. die Multimediainhalte des Unterhaltungssystems drahtlos auf die in den Sitzen integrierten Multimediaterminals zu übertragen. Für wichtige Durchsagen des Servicepersonals wird eine geringe Latenz gefordert. Multimediainhalte erfordern beim Streaming moderate Datenraten, sofern die Daten noch nicht auf dem Terminal vorliegen. Die Videodaten müssen vorher gepuffert werden, um bei kurzzeitigen Unterbrechungen einen kontinuierlichen Videostrom liefern zu können. Internetanwendungen belasten das Netzwerk mit burstartigem Datenverkehr. Eine weitere Vorgabe ist die Ausfallsicherheit der Verbindung, so dass wichtige Durchsagen nicht verloren gehen. Eine blockierte Verbindung z.B. durch Passagiere oder Servicepersonal muß durch eine alternative Verbindung überbrückt werden.

## 1.2. Problemstellung

Die im vorhergehenden Absatz beschriebenen Einsatzszenarien stellen unterschiedliche Anforderungen an das Übertragungsprotokoll. Im Folgenden werden die zu beachtenden Punkte kurz hervorgehoben.

**Hoher Datendurchsatz** Der Durchsatz in Datenverbindungen ist meist asymmetrisch, d.h. es fließen gewöhnlich mehr Daten zum Nutzer (HTTP/Video/Download) als zurück. Eine Videokonferenzverbindung generiert hingegen einen symmetrischen Datenstrom. In bestimmten Situationen (Großveranstaltungen) wird die Kapazitätsgrenze des Netzes sehr

schnell überschritten. Bei Kabelersatzanwendungen wird für drahtlose Anzeigen ein asymmetrischer und für Computerschnittstellen (USB, PCIe) ein symmetrischer Datendurchsatz angenommen.

**Datenübertragung mit niedrigen Latenzen** Die höchsten Anforderungen an Latenz und Jitter stellen interaktive Anwendungen (Gaming) sowie Sprachübertragung (Voice over IP). Eine Überschreitung der Grenzwerte führt zu verspätet eintreffenden Paketen. Das hat zur Folge, dass z.B. der Puffer des Sprachdekodierungsalgorithmus leer läuft und die Sprachausgabe aussetzt. Verlorene Pakete können neu angefordert werden, sofern die Echtzeitkriterien nicht verletzt werden.

Die Dienstgüteparameter werden anhand der zu übertragenden Daten bestimmt. Die Klassifizierung erfolgt direkt durch die Anwendung oder über spezifische Protokolle.

**Eigenschaften des Übertragungskanals** Die erreichbare Datenrate und die maximale Entfernung sind u.a. abhängig vom Frequenzband und den Ausbreitungsbedingungen im Übertragungskanal. Die Wellenlänge beeinflusst die minimale Größe der Antenne, sowie die notwendige Abstrahlcharakteristik. Eine Bündelung der Sendeenergie durch Beeinflussung der Antennenabstrahlcharakteristik (Beamforming, Beamsteering) steigert die Entfernung und erlaubt mehrere gleichzeitige unabhängige Verbindungen (siehe Abschnitt 2.7 auf Seite 18). Stark gebündelte Strahlen (Pencil Beams) setzen Sichtverbindungen (LOS<sup>1</sup>) bzw. gute Reflexionsbedingungen voraus. Entsprechend dem Szenario können die Teilnehmer auch ihre Lage verändern (Mobilität). Das erfordert eine steuerbare Antennenabstrahlcharakteristik, um den Strahl initial auszurichten und permanent nachzuführen (Tracking). Störende Objekte in LOS-Verbindungen können durch Umschaltung auf redundante Pfade, z.B. über Reflexionen oder zusätzliche Verbindungen, kompensiert werden.

**Einsatz im Innen- und Außenbereich, kurze und lange Distanzen** Das Sende-Empfangsgerät muß den Vorschriften der Regulierungsbehörden des jeweiligen Landes genügen. Dabei sind die Frequenzen, die Abstrahlungsleistungen, die Antennencharakteristiken, die Bandbreite eines Kanals und die Anzahl der Kanäle vorgegeben. Bestimmte Bandbereiche sind frei verfügbar, andere müssen entsprechend lizenziert werden oder die Nutzung ist verboten. Zusätzlich kann eine maximale Sendedauer vorgeschrieben werden. Die maximale Strahlungsleistung kann für den Innen- und Außenbereich gesondert festgeschrieben sein. Wobei für den Außenbereich eine maximale Einspeiseleistung und/oder ein entsprechender minimaler Antennengewinn festgelegt wird. Abbildung 1.1 zeigt eine Übersicht über die internationale Frequenzregulierung für das 60-GHz-Band. Weltweit steht eine gemeinsame kontinuierliche Bandbreite von ca. 5 GHz zur Verfügung. Eine Kommunikation über längere Distanzen erfordert eine Bündelung der abgestrahlten Energie und/oder eine höhere Sendeleistung. Weiterhin muß die Signallaufzeit berücksichtigt werden. Abhängig vom Frequenzband können Witterungsbedingungen Einfluss auf die Stabilität der Verbindung nehmen. Im Außenbereich kann die Verbindung während eines Regenschauers soweit beeinträchtigt werden, dass diese zusammenbricht. Arbeiten mehrere Netze im gleichen Band, muß dafür gesorgt werden, dass sich diese nicht stören.

**Verhaltens des Gesamtsystems mit und ohne Übertragungsfehler** Die Eigenschaften des Übertragungskanals bestimmen die einsetzbaren bzw. notwendigen Komponenten ei-

---

<sup>1</sup>LOS - Line-of-sight

## 1. Einführung

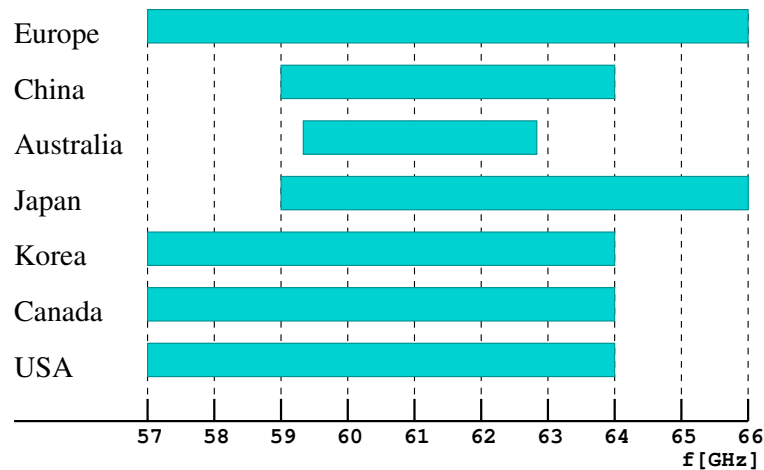


Abbildung 1.1: Internationale Frequenzregulierung im 60-GHz-Band

nes Übertragungssystems. Die maximale physikalische Datenrate ist u.a. vom Modulationsverfahren und der verfügbaren Kanalbandbreite abhängig. Die Gewährleistung einer zuverlässigen Übertragung der Daten erzeugt zusätzlichen Kommunikationsaufwand (Overhead). Die Vorwärtsfehlerkorrektur (FEC<sup>2</sup>) und die Rückwärtsfehlerkorrektur (Signalisierung von Bestätigungen) reduzieren den Datendurchsatz. Im Normalfall ist der Overhead bei gleichbleibendem Datendurchsatz und gleicher Paketlänge konstant. Verschlechtert sich der Kanal, treten häufiger Empfangsfehler auf. Eine Neuübertragung der verlorenen Pakete muß angefordert werden oder erfolgt automatisch bei einer ausbleibenden Bestätigung. Die Neuübertragung der Pakete und die zusätzliche Signalisierung führen zu einer weiteren Reduzierung des Datendurchsatzes. Erreicht die Paketfehlerrate eine bestimmte Schwelle, müssen die Parameter der FEC und/oder der Modulation angepaßt werden.

**Einsatzszenarien** Die bereits vorgestellten Einsatzszenarien lassen sich weiter variieren. Variable Parameter sind z.B.: Kanalbandbreite, Frequenzband, gemeinsamer/getrennter Sende- und Empfangskanal, Art der Antenne, Entfernung zwischen den Teilnehmern, Anzahl der Nutzer/Geräte mit Zugriff auf das Übertragungsmedium, Dienstgüteeigenschaften/QoS (Datenraten, Latenzen, Jitter), Mobilität, Redundanz der Verbindung. Vorgegebene Parameter, z.B. durch die Regulierung, nehmen Einfluss auf die anderen. Je nach Art der Information ist es möglich bzw. notwendig, eine Komprimierung der zu übertragenden Daten durchzuführen. Sind sehr geringe Latenzen zwischen Aufnahme und Ausgabe gefordert, sollten die Daten unkomprimiert übertragen werden. Steht nicht genug Bandbreite zur Verfügung muß trotzdem komprimiert werden. Ein Beispiel: *Ein verlustbehaftet komprimierter hoch aufgelöster Multimediadatenstrom benötigt für den Transport eine Datenrate von ca. 50 MBit/s, jedoch für die unkomprimierte Ausgabe auf einem entsprechenden Anzeigergerät (TV, Monitor) über die HDMI-Schnittstelle 3 bis 6 GBit/s.*

Anwendungen für mobile Teilnehmer erfordern zusätzliche Funktionen, wie z.B. die Ermittlung der Position für positionsbasierte Dienste.

---

<sup>2</sup>FEC - Forward Error Correction

### 1.3. Lösungsansätze und wissenschaftlicher Beitrag

Basierend auf der Problemstellung wird im Rahmen dieser Arbeit ein Medienzugriffsprotokoll entwickelt und evaluiert. Folgende Punkte werden dabei bearbeitet:

**Steigerung des Datendurchsatzes durch Reduzierung des Protokoll-Overheads und der Verarbeitungslatenz** Der Datendurchsatz ist abhängig von der Anzahl der Teilnehmer, der Effizienz des Medienzugriffsprotokolls, der Latenzen der digitalen Basisbandverarbeitung und der Datenrate. Je höher die Datenrate, desto größer wird der Einfluss der Latenzen der Basisbandverarbeitung, d.h. die Systemeffizienz sinkt. Je mehr Teilnehmer dem System hinzugefügt werden, desto geringer wird der Datendurchsatz pro Teilnehmer, es sei denn, die Teilnehmer können unabhängig voneinander kommunizieren.

Der Medienzugriff wird über eine vorberechnete zeitschlitz-basierte Verbindungsvorschrift koordiniert. Das erlaubt die gleichzeitige Übertragung von Daten zwischen verschiedenen Teilnehmern und steigert so den Datendurchsatz des Systems.

**Reduzierung der Latenzen durch Entwicklung effizienter Hardwarekomponenten für den Daten- und Kontrollpfad** Hohe Datenraten mit niedrigen Übertragungslatenzen setzen spezielle Verarbeitungsstrukturen für die Algorithmenimplementierung voraus. Der Einsatz in unterschiedlichen Szenarien erfordert eine flexible Daten- und Kontrollpfadarchitektur, die vorzugsweise auch zur Laufzeit angepaßt werden kann. Die Auswahl der Integration der Algorithmen in Hard- bzw. Software (Hardware/Software-Codesign) ist abhängig von der maximal zulässigen Ausführungszeit und dem angestrebten Ressourcenverbrauch und nimmt direkt Einfluss auf die Latenz und den resultierenden Datendurchsatz. Das Kontroll- und Datenpaketformat muß auf den Einsatz und die geforderten Eigenschaften abgestimmt werden. Die Paketpufferstruktur ist abhängig vom Einsatzszenario und den dazugehörigen Medienzugriffsverfahren. Weiterhin wirken sich Verzögerungen innerhalb und zwischen den Komponenten des Übertragungssystems (cross layer), z.B. Algorithmen des digitalen Basisbandprozessors und des Medienzugriffsverfahrens, auf die Performanz des Gesamtsystems aus.

Es wird eine flexible Systemarchitektur für ein Medienzugriffsprotokoll vorgestellt, das alle zuvor genannten Einsatzszenarien unterstützt und in Hardware implementiert werden kann. Die Latenzen werden durch ein speziellen Datenpfad verringert, so dass auch Multi-Hop-Szenarien davon profitieren.

Eine Anwendungsschnittstelle für nutzerspezifische Algorithmenimplementierungen mit exklusivem Zugriff auf das Übertragungsmedium erlaubt die Integration zusätzlicher Funktionalität in das System.

**Unterstützung verschiedener Einsatzszenarien und Skalierbarkeit des Systems** Ausgehend von einem Punkt-zu-Punkt-Kommunikationssystem wird das MAC-Protokoll erweitert, so dass Punkt-zu-Mehrpunkt-Betrieb in Single-Hop<sup>3</sup>- und Multi-Hop<sup>4</sup>-Szenarien möglich ist. Es werden bis zu 256 Stationen bzw. Knoten unterstützt. Die Bestätigung für die erfolgreiche Übertragung eines Paketes erfolgt von Knoten zu Knoten.

**Maßnahmen zur Inbetriebnahme eines Netzes** Damit eine Übertragung stattfinden kann, müssen sich die Teilnehmer finden und neue Teilnehmer in eine bestehende Struktur

---

<sup>3</sup>Single-Hop: Transport eines Paketes in einem Schritt zum Endknoten

<sup>4</sup>Multi-Hop: Transport eines Paketes zum Endknoten über Zwischenknoten

## 1. Einführung

integriert werden. Der Aufwand für die Nachbarschaftssuche hängt von den Umgebungsbedingungen (Entfernung, LOS, NLOS) und den Eigenschaften des Übertragungsgerätes (Antennenabstrahlcharakteristik, Sendeleistung) ab. Die Nachbarschaftssuche ist sehr wichtig für den Aufbau und den Betrieb von Ad-Hoc-Netzwerken mit mobilen Teilnehmern. Die initiale Suche der Position der Teilnehmer wird durch ein zum Patent angemeldetes beschleunigtes Teilnehmersuchverfahren durchgeführt.

**Maßnahmen bei Veränderung der Umgebungsbedingungen** Fällt eine Verbindung zwischen zwei Teilnehmern aus, besteht in vermaschten Netzen die Möglichkeit, einen redundanten Pfad über andere Teilnehmer zu wählen.

Die Struktur eines Netzes kann statisch vorgegeben oder dynamisch aufgebaut werden (ad-hoc). Ein Pfadaktualisierungsprotokoll (z.B. DVRP - Distance Vector Routing Protocol) ermittelt alle Wege zwischen den Teilnehmern im Netz. Die Reaktionszeit auf Änderungen der Struktur ist abhängig vom Aktualisierungsintervall und der Anzahl der Teilnehmer.

Die Detektierung einer ausgefallenen Verbindung erfolgt durch die Beobachtung der verlorengegangenen Pakete am Empfänger sowie durch die ausbleibenden Bestätigungen am Sender. Im Gegensatz zu Pfadaktualisierungsprotokollen mit großen Aktualisierungsintervallen, kann hier sehr schnell reagiert werden. Dazu wird vom Master eine alternative vorberechnete Verbindungsvorschrift für die betroffenen Geräte aktiviert.

Die Verbindungseigenschaften bestimmen außerdem die Auswahl des Modulations- und des Fehlerkorrekturverfahrens. Die Sendeleistungssteuerung verhindert Fehlanpassungen des Empfängereingangsverstärkers (Unter- oder Übersteuerung) und erlaubt so den Betrieb sowohl mit kleiner als auch mit großer Distanz bzw. bei schlechteren Umgebungsbedingungen (Nebel, Regen).

### 1.4. Relevante Publikationen

Im Kontext dieser Arbeit sind eine Reihe von Publikationen entstanden:

- Ehrig, M., Petri, M., Sark, V., and Grass, E.; *Combined high-resolution ranging and high data rate wireless communication system in the 60-GHz-Band.; WPNC 2014* [1]

In dieser Veröffentlichung wird das Kommunikationssystem aus [2] mit einer Entfernungsmessung kombiniert. Das MAC-Protokoll wurde dazu um eine Anwendungsschnittstelle für den direkten Zugriff auf das Übertragungsmedium erweitert und steuert zusätzlich die Umschaltung zwischen Kommunikation und Entfernungsmessung.

- Petri, Ehrig; *DE-Patentanmeldung 102013218862.5: Verfahren zur automatischen Antennenausrichtung und Sendeleistungsregulierung und Richtfunkssystem; 2013* [3]  
Das Patent beschreibt ein Verfahren für die schnelle initiale Suche von benachbarten Stationen/Geräten/Teilnehmern mit elektronisch steuerbaren Smart-Antennas in Systemen mit unbekannten Distanzen zwischen mehreren Teilnehmern.

- Ehrig, M., Petri, M.; *60 GHz broadband MAC system design for cable replacement in machine vision applications.; AEU - International Journal of Electronics and Communications 67, 12, Aug. 2013* [2]

Basierend auf [4] wird in dieser Arbeit ausführlich auf den MAC und die notwendigen Maßnahmen zum Erreichen des hohen Datendurchsatzes eingegangen. Zusätzlich wird die Performanz des Gesamtsystems evaluiert.

- Ehrig, M., Petri, M.; *60 GHz Wireless Broadband Cable Replacement for Machine Vision Applications.; ISSSE 2012* [4]  
Es wird ein latenzarmes drahtloses Medienzugriffsprotokoll mit hohem Datendurchsatz in Kabelersatzszenarien vorgestellt. Dabei wird eine Industriekamera über Gigabit-Ethernet drahtlos an den Host angebunden.
- Ziegler, V. et.al.; *Broadband 57-64 GHz WLAN communication system integrated into an aircraft cabin.; IEEE MTT-S International; 2012* [5]  
Diese Arbeit präsentiert Ergebnisse des EASY-A Projektes. Es wird eine drahtlose Kommunikationslösung vorgestellt, die die Multimediaterminals in den Flugzeugsitzen ausfallsicher mit dem Entertainment-System verbindet. Die Ausfallsicherheit wird durch eine MAC-Lösung mit redundanten Verbindungen sichergestellt.
- Choi, C., Piz, M., Ehrig, M., Grass, E.; *Gbps OFDM Baseband Design und Implementation for 60 GHz Wireless LAN Applications in Yong, S.-K., Xia, P., and Valdes-Garcia, A.; 60GHz Technology for Gbps WLAN and WPAN: from Theory to Practice.; John Wiley & Sons; 2011* [6]  
In diesem Buchkapitel wurden Testergebnisse des 60-GHz-Demonstrators des WIGWAM-Projektes vorgestellt.

## 1.5. Aufbau der Dissertation

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt strukturiert: Nach einer Einführung in die Grundlagen der drahtlosen Übertragung wird speziell auf die Medienzugriffsprotokolle eingegangen. Dabei wird eine Übersicht über die relevanten Standardisierungen mit den jeweils benutzten Verfahren gegeben. Anschließend werden die Anforderungen an ein Hochleistungsmedienzugriffsprotokoll herausgearbeitet. Dabei wird besonders auf die Reduzierung des Overheads eingegangen. Basierend darauf wird ein MAC-Protokoll für die latenzarme Datenübertragung mit höchstem Datendurchsatz für die Integration in eine programmierbare Hardware entwickelt. Für die Evaluation unterschiedlicher Leistungsparameter des Zugriffsprotokolls in einfachen und komplexen Kommunikationsszenarien wird eine Simulationsumgebung vorgestellt. Danach werden die Ergebnisse der bereits vorhandenen MAC-Hardwareimplementierungen für ein Punkt-zu-Mehrpunkt- und für ein Punkt-zu-Punkt-Kommunikationssystem evaluiert. Die speziellen MAC-Hardwareimplementierungen wurden jeweils zusammen mit einem Basisbandprozessor und einem analogem 60-GHz-Frontend in zwei Demonstratoren integriert und die Funktionalität in realen Einsatzszenarien getestet. Auf der Basis der evaluierten Systemarchitekturen wird eine Hardwarearchitektur für das vorgestellte MAC-Protokoll entwickelt. Diese unterstützt mehrere Teilnehmer im Single- und Multi-Hop-Betrieb, bietet einen hohen Datendurchsatz und eine niedrige Übertragungslatenz für die vorgestellten Einsatzszenarien.





## 2. Drahtlose Datenübertragung

Heinrich Hertz gelang es 1886 zum ersten Mal, elektromagnetische Wellen von einem Sender zu einem Empfänger zu übertragen. 1895 führte Guglielmo Marconi erste Versuche mit drahtloser Übertragung durch. Dabei wies er u.a. nach, dass auch eine Übertragung ohne (direkte) Sichtverbindung möglich ist. Einige Monate später überbrückte er eine Entfernung von 2,5 km. Mittlerweile ist die drahtlose Kommunikation ein Bestandteil und Bedürfnis unseres Lebens. Dabei sind Verbindungen über kurze Entfernungen bis zu Satellitenverbindungen Stand der Technik.

Bei der Übertragung durch das Medium Luft werden die Wellen physikalischen Effekten ausgesetzt. Abschattung durch Objekte verringert die Leistung des empfangenen Signals. Brechung, Streuung, Reflexion und Beugung verursachen Überlagerungen der Wellen, die zur Auslöschung oder Verschlechterung aber auch zur Verstärkung des Signals führen können. Beugung ermöglicht z.B. Verbindungen über Bergkuppen oder um Häuserecken. Reflexionen der Wellen an der Ionosphäre erlauben auch Verbindungen, die aufgrund der Erdkrümmung sonst nicht möglich wären.

Verbindungen, die nicht auf direktem Weg erfolgen, werden Nicht-Sichtverbindungen (NLOS<sup>5</sup>) genannt. Bei Sichtverbindungen muß darauf geachtet werden, dass sich innerhalb der ersten Fresnelzone keine Objekte befinden, da sonst zusätzliche Übertragungsdämpfungen entstehen.

Erreicht das gesendete Signal den Empfänger auf verschiedenen Wegen (Mehrwegeausbreitung / Multi-Path), wird es durch die längeren Umwegpfade entsprechend der Laufzeit verzögert, d.h. das Signal am Empfänger besteht aus der Überlagerung aller verzögerter Signale. Der Effekt nennt sich Laufzeitdispersion (Delay Spread) und verursacht im Allgemeinen eine Inter-Symbol-Interferenz (ISI). Diese lässt sich durch die Nutzung schmaler Bandbreiten, einer Kanalschätzung, kleiner(er) Zellen mit kleiner Laufzeitdispersion und spezieller Modulationsverfahren wie OFDM<sup>6</sup> vermeiden. Überlagerungen der Signale erzeugen lokale Leistungsminima und -maxima. Die Abstände zwischen den Einbrüchen treten periodisch mit ungefähr der halben Wellenlänge  $\lambda$  auf. Das Problem kann durch ein Mehrantennensystem mit  $\lambda/2$ -Antennenabstand gelöst werden, indem die Signale der einzelnen Antenneneingänge aufsummiert werden bzw. das stärkste Signal dem Empfänger zugeführt wird.

### 2.1. Blockschema eines drahtlosen Nachrichtenkommunikationssystems

Ein Nachrichtenkommunikationssystem lässt sich in mehrere Blöcke unterteilen: den Sender, das Übertragungsmedium und den Empfänger. Abbildung 2.1 zeigt die Blockübersicht eines Nachrichtenübertragungssystems. Die Datenquelle liefert die zu übertragenden Daten, z.B. digitalisierte Meßwerte. Mit Hilfe der Quellenkodierung werden Redundanzen durch verlustlose bzw. verlustbehaftete Kompressionsverfahren entfernt. Da der Kanal mehr oder weniger fehlerbehaftet ist, werden vor der Übertragung wieder Redundanzen durch die Kanalkodierung hinzugefügt. Die Leitungskodierung paßt die zu übertragenden Nachrichten an den Übertragungskanal an, z.B. durch Modulation (siehe Abschnitt 2.3). Bei der Übertragung über das Medium (Übertragungskanal) wird das Signal beeinflusst. Auf der Empfangsseite werden die im Sender benutzten Verfahren wieder rückgängig gemacht. Die Leitungsdekodierung demoduliert das empfangene Signal und versucht die Übertragungseffekte mit geeigneten Verfahren zu kompensieren. Die Kanaldekodierung

---

<sup>5</sup>NLOS - Non-Line-of-Sight

<sup>6</sup>OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplex

## 2. Drahtlose Datenübertragung

stellt mit Hilfe der zusätzlich übertragenden Informationen die eigentliche Nachricht wieder her. Die Quellendekodierung dekomprimiert die Daten, welche anschließend von der Datensenke verarbeitet werden. Da die Leitungs- und die Kanalkodierung nicht perfekt arbeiten (auf statistischen Modellen basierend) bleibt eine Restfehlerwahrscheinlichkeit. Das Auftreten der Fehler muß detektiert werden und mit geeigneten Maßnahmen, wie z.B. Neuübertragung der Daten, beseitigt werden.

Abbildung 2.2 zeigt die Blockübersicht einer Implementierung eines Nachrichtenübertragungssystems. Die Anwendung übernimmt die Funktionen der Datenquelle und -senke, sowie der Quellenkodierung und -dekodierung. Die Kanalkodierung und die digitale Modulation und Demodulation als Teil der Leitungskodierung und -dekodierung werden im sogenannten Basisbandprozessor (BB) vorgenommen. Die analoge Modulation und Demodulation als weiterer Teil der Leitungskodierung erfolgen im analogen Frontend (AFE). Die Medienzugriffssteuerung (MAC<sup>7</sup>) übernimmt die Funktion der Koordinierung des Zugriffs mehrerer Teilnehmer auf das gemeinsame Übertragungsmedium Luft.

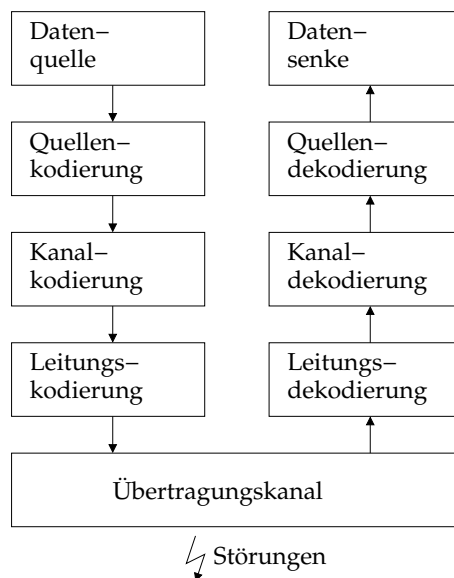


Abbildung 2.1: Nachrichtenübertragungssystem

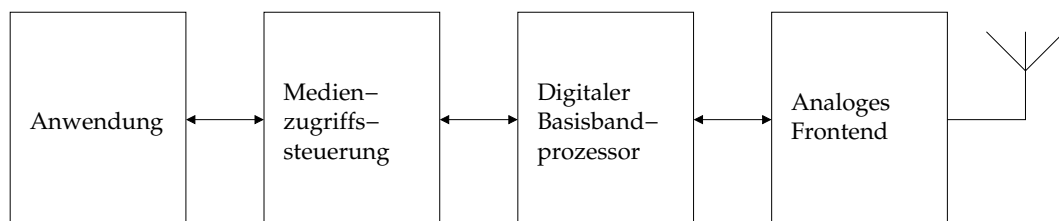


Abbildung 2.2: Drahtloses Nachrichtenkommunikationssystem

<sup>7</sup>MAC - Medium Access Controller

## 2.2. Referenzmodelle

Im Vergleich zur Übersicht des Nachrichtenübertragungssystems (Abbildung 2.1) mit der des drahtlosen Kommunikationssystems (Abbildung 2.2) fehlen beim Ersteren wichtige Komponenten für die Funktion eines Kommunikationssystems, wie z.B. die Teilnehmer-adressierung und die Medienzugriffssteuerung.

Deshalb wurde für Kommunikationssysteme ein OSI<sup>8</sup>-Referenzmodell durch die ISO<sup>9</sup> standardisiert, welches das System in Schichten (Layer) mit festgeschriebenen Aufgaben einteilt. Abhängig vom Protokoll (ISDN, ATM, TCP/IP) kann die Schichtenanordnung auch variieren.

Jede Schicht stellt spezifische Dienste zur Verfügung und wird über definierte Schnittstellen angesprochen. Logisch erfolgt die Kommunikation zwischen Sender und Empfänger immer nur in der gleichen Schicht. Die Implementierung einer Schicht lässt sich austauschen, so dass unterschiedliche Verfahren für den Datenaustausch genutzt werden können.

Die ITU-T<sup>10</sup> erweiterte das Modell auf die Belange der Telekommunikation. Auch die IEEE<sup>11</sup> definiert z.B. ein angepaßtes Referenzmodell für den IEEE 802.11 Standard. Die genannten Modelle werden im Folgenden vorgestellt.

### 2.2.1. OSI-Referenzmodell

Abbildung 2.3a zeigt eine Übersicht des OSI-Modells. Das Modell besteht aus folgenden Schichten:

**Schicht 1 - Bitübertragungsschicht (physical layer - PHY layer)** Die unterste Schicht stellt den physikalischen Zugang zum Übertragungsmedium her. In der drahtlosen Übertragung befindet sich in dieser Schicht das Basisbandmodem und das Radio.

**Schicht 2 - Sicherungsschicht (data link layer)** Die (Daten-)Sicherungsschicht soll eine zuverlässige und fehlerfreie Übertragung gewährleisten und koordiniert den Medienzugriff. Der Datenstrom wird in Rahmen (Frames) eingeteilt und mit Prüfsummen versehen, um fehlerhafte Pakete zu detektieren. Weiterhin erfolgt hier die Datenflusskontrolle, so dass im Empfänger ein Pufferüberlauf verhindert wird. Nach der IEEE ist Schicht 2 weiter unterteilt in Schicht 2a: der Medienzugriffssteuerung (MAC) und Schicht 2b: der logischen Linksteuerung (LLC<sup>12</sup>).

**Schicht 3 - Vermittlungsschicht (network layer)** Die Vermittlungsschicht sorgt für die Weitervermittlung von Datenpaketen, gesteuert durch Routingtabellen. Weiterzuleitende Datenpakete werden nicht an höhere Schichten gegeben, sondern mit einem neuen Zwischenziel wieder versendet. Die Vermittlungsschicht stellt netzwerkübergreifende Adressen zur Verfügung und hält die Routingtabellen aktuell. Ein wichtiges Protokoll dieser Schicht ist das Internet Protokoll (IP).

**Schicht 4 - Transportschicht (transport layer)** In dieser Schicht werden die Daten der anwendungsorientierten Schichten 5-7 an die Eigenschaften des Kommunikationsnetzes angepaßt. Dazu gehört die Segmentierung des Datenstromes sowie die Stauvermeidung.

<sup>8</sup>OSI - Open Systems Interconnection

<sup>9</sup>ISO - International Organization for Standardization

<sup>10</sup>ITU-T - International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector

<sup>11</sup>IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

<sup>12</sup>LLC - Logical Link Control

## 2. Drahtlose Datenübertragung

**Schicht 5 - Sitzungsschicht (session layer)** Diese Schicht stellt Dienste für einen organisierten und synchronisierten Datenaustausch zur Verfügung. Sie sorgt für die Sitzungswiederherstellung nach einer Kommunikationsunterbrechung.

**Schicht 6 - Darstellungsschicht (presentation layer)** Die Darstellungsschicht konvertiert die lokale Datendarstellung in eine allgemeingültige, damit die Daten auf verschiedenen Systemen (little endian, big endian, ASCII, EBCDIC, ASN.1) syntaktisch korrekt interpretiert werden können. Dazu gehören auch Verschlüsselung und Datenkompression.

**Schicht 7 - Anwendungsschicht (application layer)** Die Anwendungsschicht stellt Netzwerkdienste für Anwendungen zur Verfügung.

### 2.2.2. Referenzmodell für die Telekommunikation

Die Abbildung der Telekommunikationswelt benötigt weitere Funktionen. Diese werden in der Steuer- und Managementebene definiert. Abbildung 2.3b zeigt die Darstellung dieses Modells als Würfel. Daten-, Steuer- und Managementeinheiten sind Dienste der jeweiligen Schicht.

**Datenebene (data/user plane)** Die Nutzdateneinheiten regeln den Transport der Nutzerinformation durch Schalten, Multiplexen, Datenflusskontrolle und Bereitstellung von Datenzuverlässigkeit.

**Steuerebene (control plane)** Die Steuereinheiten kontrollieren den Aufbau und den Abbau der Kommunikationsverbindung zwischen den Nutzdateneinheiten.

**Managementebene (management plane)** Die Managementeinheiten steuern die Funktion der Nutzdaten- und Steuereinheiten.

### 2.2.3. IEEE 802.11 Referenzmodell

Abbildung 2.4 zeigt eine Übersicht des Referenzmodells für den IEEE 802.11 WLAN Standard. Auch hier gibt es zusätzliche Managementeinheiten, die mit den Schichten interagieren.

**MAC Layer Management Entity (MLME)** In der MLME befindet sich die PHY- und MAC-Zustandssteuerung. Beispiel für Zustände, die die MLME steuert, sind: Authenticate, Deauthenticate, Associate, Disassociate, Reassociate, Beacon, Scan, Channel Switch, Timing Synchronization Function (TSF), Power Management, Spectrum Management, Transmit Power Management.

**Physical Layer Management Entity (PLME)** Diese Einheit steuert lokale PHY-Schichtfunktionen wie die Sendeleistung, das Modulations- und Fehlerkorrekturverfahren, die Auswahl des Kanals (Frequenz).

**Station Management Entity (SME)** Diese Einheit ist die übergeordnete Einheit der Schichtenmanagementeinheiten.

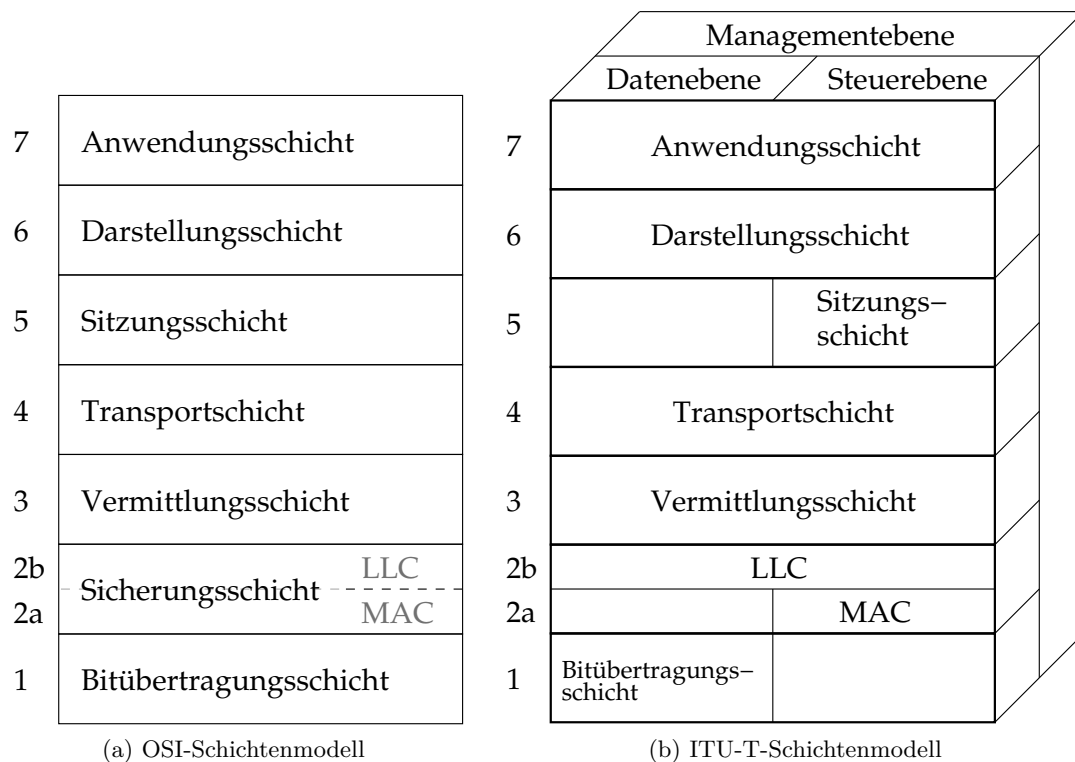


Abbildung 2.3: OSI-Schichtenmodell mit Erweiterung für Telekommunikationsdienste

## 2.3. Modulationsverfahren

Damit digitale Daten effizient in der Luft übertragen werden können, müssen diese an den Übertragungskanal angepaßt werden. Dazu werden die digitalen Signale mit Hilfe digitaler Modulationsverfahren in ein Basisbandsignal umgewandelt und anschließend mit Hilfe der analogen Modulation auf eine zum Übertragungskanal passende Trägerfrequenz  $f_T$  verschoben. Die Wahl der Trägerfrequenz bestimmt u.a. die Größe/Länge der Antenne und ermöglicht eine Mehrfachnutzung des Kanals durch Frequenzmultiplex (siehe Abschnitt 2.7.2 auf Seite 18).

Digitale Modulationsverfahren können in Ein- und Mehrträgerverfahren eingeteilt werden. Die Auswahl des Verfahrens ist abhängig von den Übertragungsbedingungen im Kanal. Einträgerverfahren (SC<sup>13</sup>) eignen sich, aufgrund der im Vergleich kurzen Symboldauer, vor allem in Kanälen ohne Mehrwegeausbreitung. Mehrträgerverfahren (MC<sup>14</sup>) teilen die Datenrate auf viele Unterträger auf, vergrößern so die Symboldauer und verringern damit die Auswirkungen der Mehrwegeausbreitung (ISI). Ein populäres Mehrträgerverfahren ist OFDM. Die Modulationsarten für Einträgerverfahren sowie für die Unterträger des Mehrträgerverfahrens sind z.B. BPSK, QPSK, 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM<sup>15</sup>. Hier werden die Bits in Signalzustände kodiert, die sich in einem zweiachsigen Koordinatensystem darstellen lassen. Die *In-Phase*-Komponente (I) bezeichnet eine Phasenumtastung und die *Quadrature-Phase*-Komponente (Q) eine Amplitudenumtastung. Abbildung 2.5a und b zeigen zwei ideale Konstellationsdiagramme einer 4- und 16-QAM. Abbildung 2.5c zeigt eine reale Aufnahme mehrerer dekodierter Symbole. 4-QAM kodiert zwei Bits in vier

<sup>13</sup>SC - Single Carrier

<sup>14</sup>MC - Multi Carrier

<sup>15</sup>BPSK/QPSK/QAM - Bi-Phase- & Quarternary Phase Shift Keying, Quadrature Amplitude Modulation

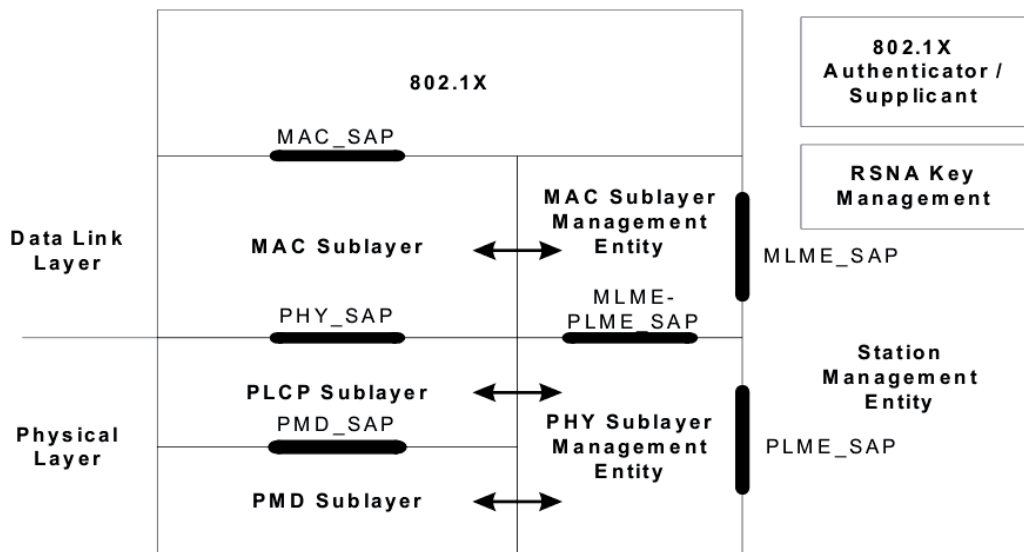


Abbildung 2.4: ISO-Referenzmodell des IEEE 802.11 Standards [7]

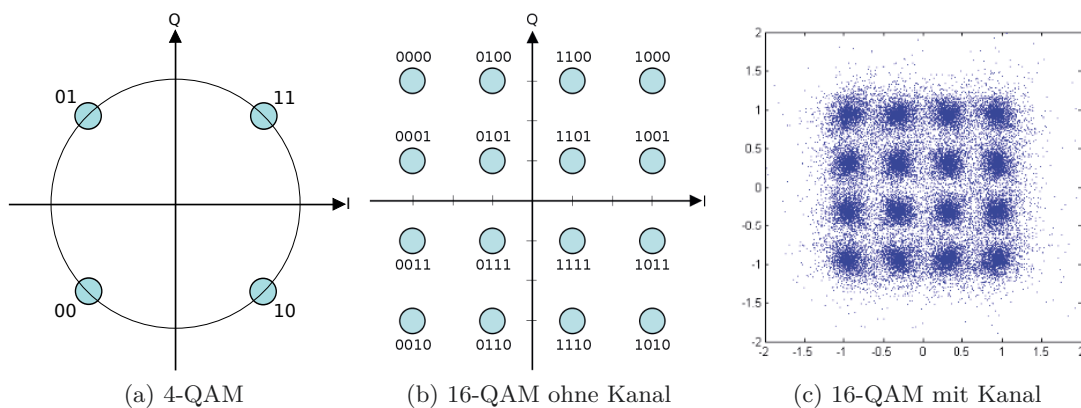


Abbildung 2.5: Konstellationsdiagramme für QPSK und 16-QAM mit/ohne Kanal

Zustände und 16-QAM vier Bits in 16 Zustände. Es wird jeweils Phasen- und Amplitudenuntastung genutzt. Es zeigt sich auch, dass mit höherer Modulationsart der Abstand zwischen den kodierten Zuständen kleiner ist. Für die korrekte Demodulation wird bei gleicher Rauschleistung ein höherer Signal-Rausch-Abstand ( $\text{SNR}^{16}$ ) benötigt. Weitergehende Ausführungen finden sich z.B. in [8, 9].

## 2.4. Fehlerkorrekturverfahren

Jedes Signal wird während der Übertragung mit Störeinflüssen beaufschlagt (siehe Bild 2.5c). Das kann zur Folge haben, dass die dekodierten Bits nicht den gesendeten entsprechen. Die Datenübertragung erfolgt gewöhnlich in Datenpaketen, d.h. jedes fehlerhaft dekodierte Bit innerhalb eines Datenpaketes zerstört die Integrität des kompletten Datenpaketes. Eine Möglichkeit der Fehlerkorrektur ist die Anforderung einer Übertragungswiederholung über einen Rückkanal. Das ist aber nicht immer möglich bzw. praktikabel, z.B.

---

<sup>16</sup>SNR - Signal-to-Noise Ratio

im digitalen Rundfunk DVB-T/C/S<sup>17</sup>. Hier wird die vorwärtsgerichtete Fehlerkorrektur (FEC<sup>18</sup>) eingesetzt, die im Abschnitt 3.2.3 auf Seite 28 näher erläutert wird.

## 2.5. Leistungsübertragungsbilanz (Link budget)

Die Fähigkeit das empfangene Signal korrekt zu dekodieren wird vom Signal-Rausch-Abstand  $SNR$  bestimmt. Dieser ist abhängig von der Leistungsübertragungsbilanz  $P_{RX}$  und der Rauschleistung  $P_{NRX}$  des Empfängers und wird nach (1) berechnet.

$$SNR[dB] = P_{RX} - P_{NRX} \quad (1)$$

Die Leistungsübertragungsbilanz  $P_{RX}$  ist ein Maß für die Qualität des Übertragungskanal und wird meistens in Dezibel (dB) angegeben. Dazu werden die Gewinne und Verluste des Übertragungspfades mit der Sendeleistung  $P_{TX}$  verrechnet. Der Sende- und Empfangsantennengewinn  $G_{TX}$ ,  $G_{RX}$  wird jeweils addiert. Die Freiraumdämpfung  $F$  und zusätzliche medien- und situationsabhängige Dämpfungen  $F_A$  werden abgezogen. Mit Hilfe der Friis'schen Formel (2) lässt sich so die Leistung  $P_{RX}$  des empfangenen Signals nach der Empfangsantenne berechnen.

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - F - F_A \quad (2)$$

Die Freiraumdämpfung  $F$  ist proportional zum Quadrat des Abstands  $d$  zwischen Sender und Empfänger und wird nach (3) berechnet. Die Freiraumdämpfung kann unter Idealbedingungen nicht unterschritten werden.

$$F [dB] = 10 \log_{10} \left[ \left( \frac{4\pi df}{c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Zusätzlich zur Freiraumdämpfung addieren sich molekulare Absorptionseffekte in der Atmosphäre, die z.B. abhängig von den Resonanzfrequenzen des Wasserdampfes, des Sauerstoffs und anderer Gase sind. Im 60-GHz-Band existiert ein Absorptionsmaximum durch Sauerstoffmoleküle und beträgt ca.  $F_{O_2} = 0,015 \text{ dB/m} = 15 \text{ dB/km}$  und geht in  $F_A$  ein. Zunehmende Luftfeuchtigkeit verschlechtert zusätzlich die Ausbreitungsbedingungen.  $F_A$  beinhaltet auch zusätzliche Dämpfungen auf dem Übertragungsweg, die durch Komponenten wie Kabel und Kupplungen eingefügt werden. Ist die erste Fresnelzone zur Hälfte verdeckt, so wird das Empfangssignal zusätzlich um 6 dB gedämpft. Abhängig vom Öffnungswinkel der Antennen und dem Versatz der Antennenausrichtung zwischen den Stationen (siehe Abschnitt 6.1.1 auf Seite 97) wird eine zusätzliche Dämpfung eingefügt. Die zusätzlichen Dämpfungen durch die Verletzung der Fresnelzone und den Versatz der Antennenausrichtung geht in  $F_A$  ein.

Die Rauschleistung  $P_{NRX}$  besteht aus dem thermischen Rauschen  $P_N$  und der Rauschzahl ( $NF$ <sup>19</sup>) und wird nach (5) berechnet.

$$P_{NRX} = P_N + NF \quad (4)$$

Das thermische Rauschen<sup>20</sup>  $P_N$  ist von der absoluten Temperatur  $T$  [K], der Bandbreite  $B$  [Hz] des Signals und der Boltzmann-Konstante  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  abhängig und wird nach (7) berechnet.

$$P_N = k_B T B \quad (5)$$

<sup>17</sup>DVB - Digital Video Broadcasting, T:terrestrisch, C:Kabel, S:Satellit

<sup>18</sup>FEC - Forward Error Correction

<sup>19</sup>NF - Noise-Figure

<sup>20</sup>Johnson-Nyquist-Rauschen

## 2. Drahtlose Datenübertragung

Der Empfänger generiert zusätzliches Rauschen, das mit der Rauschzahl  $NF$  bei  $17^\circ C \cong 290 K$  spezifiziert wird.

Aus dem  $SNR$  kann nun die Energie pro Nutzbit  $E_b N_0$  nach (6) errechnet werden, um die Bitfehlerraten (BER) der einzelnen Modulations- und Kodierungsverfahren fair untereinander vergleichen zu können.  $f_b$  ist die Nettodatenrate und  $B$  die Bandbreite.

$$E_b N_0 [dB] = SNR [dB] - 10 \log_{10} \left( \frac{f_b}{B} \right) \quad (6)$$

Abbildung 2.6 auf Seite 20 zeigt Beispiele für das Link Budget der drei Funkfrequenzbänder (2,4/5/60 GHz) des IEEE 802.11-Standards. Die Diagramme der oberen Abbildung zeigen den Pfadverlust, die resultierende Empfangsleistung und den SNR bei einer Strahlungsleistung (EIRP<sup>21</sup>) von 15 dBm über eine kurze Distanz bis 20 m. Die Diagramme der unteren Abbildung zeigen den Pfadverlust, die resultierende Empfangsleistung und den SNR bei einer Strahlungsleistung von 40 dBm und einer Entfernung bis 1 km. Die Rauschzahl ist jeweils  $NF = 8$  dB und die resultierende Rauschleistung  $P_{NRX}$  wird nach (7) bestimmt.

$$\begin{aligned} P_N &= k_B T B = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K \cdot 290 K \cdot 2,16 \cdot 10^9 Hz = 8,64 \cdot 10^{-12} W \quad (7) \\ &= 8,64 \cdot 10^{-9} mW \cong -80,63 dBm \\ P_{NRX} &= P_N + NF = -72,63 dBm \end{aligned}$$

Abbildung 2.7 auf Seite 21 zeigt Simulationsergebnisse der Paketfehlerraten (PER) des EASY-A-Basisbandprozessors für BPSK, QPSK und 16-QAM Modulationen mit dem Kanalmodell CM1.2 LOS Szenario [10].

Aus den vorher berechneten Werten und den Simulationsergebnissen kann nun die maximale Distanz für das eingesetzte Modulations- und Fehlerkorrekturverfahren bestimmt werden, ab der eine vorgegebene Paketfehlerrate überschritten wird. Ist keine zusätzliche *entfernungsabhängige* (Sauerstoff-)Dämpfung enthalten, kann die maximale Entfernung  $d$  direkt nach (8) berechnet werden. Sonst muß die entsprechende Entfernung aus Abbildung 2.6 abgelesen bzw. numerisch mit der *Lambert-W*-Funktion gelöst werden.

$$d \leq \frac{c}{4\pi f} \cdot 10^{\frac{SNR [dB]}{20}} \quad (8)$$

Wird z.B. für QPSK-1/2 (ohne RS) eine PER von  $1,2 \cdot 10^{-2}$  gefordert, so ist  $E_b N_0 = 7,22 dB$  (aus Abbildung 2.7a) und das resultierende Signal-Rausch-Verhältnis nach (9)  $5 dB$ , wobei  $f_b = 1,295 GBit/s$  (aus Tabelle A.1 auf Seite 153) und  $B = 2,16 GHz$  gesetzt ist. Mit einer EIRP von 15 dBm wird eine Entfernung von 16 m und mit einer EIRP von 40 dBm eine Entfernung von 700 m erreicht.

$$SNR [dB] = E_b N_0 [dB] + 10 \log_{10} \left( \frac{f_b}{B} \right) = 7,22 + (-2,22) = 5 dB \quad (9)$$

<sup>21</sup>EIRP - Äquivalente isotrope Strahlungsleistung: Summe aus eingespeister Sendeleistung  $P_S$  und Antennengewinn  $G_i$  relativ zu einem Isotropstrahler



## 2.6. Kommunikationsszenarien

Abbildung 2.8 zeigt drei typische Netztopologien für drahtlose Kommunikationsszenarien. Bei der Sterntopologie bildet eine Kommunikationseinheit ein zentrales Element, mit dem alle Teilnehmer direkt verbunden sind. Die Kommunikation zum Zentrum erfolgt in einem Schritt (Single-Hop). Sind die zentralen Elemente selbst miteinander über einen Verteiler verbunden, dann bilden sie ein Stern-Stern-Netz bzw. eine Baumtopologie. Das Daisy-Chain-Szenario, in dem mehrere Knoten in einer Kette miteinander verbunden sind, bildet ebenfalls eine Baumtopologie. Fällt eine Verbindung aus, so ist die Kette unterbrochen. Sind die Knoten untereinander verbunden, spricht man von einem vermaschten Netz (Mesh-Netz). Fällt hier eine Verbindung aus, kann die Kommunikation über einen anderen Weg fortgesetzt werden.

In dezentralen Ad-Hoc-Netzen verbinden sich die Knoten bei Bedarf mit dem Netz. Dabei ist kein zentraler Steuerungsknoten notwendig. Jeder Knoten kann mit jedem kommunizieren. In zentralisierten Netzen wird ein zentraler Knoten (AP<sup>22</sup>) definiert. Jede Kommunikation erfolgt über diesen Knoten als Vermittler. In Knoten mit gerichteter Antennenabstrahlung können mehrere Teilnehmer unabhängig voneinander kommunizieren (siehe Raummultiplex im nächsten Abschnitt). Der zentrale Knoten koordiniert dann jeweils die Interferenzfreiheit der parallelen Übertragungen. Mehrere dieser APs können über einen separaten Weg<sup>23</sup> verbunden werden, so dass die Netzabdeckung vergrößert wird. Ein mobiler Knoten wird dann von einem AP zu einem anderen übergeben (Handover) und kann trotzdem mit den anderen Teilnehmern kommunizieren. Die zusätzliche Kommunikation für die Signalisierung und die Weiterleitung der Daten zwischen den Zugangspunkten erfolgt über die Backplane und belastet so den Funkkanal nicht zusätzlich.

Sendet ein Knoten eine Nachricht gleichzeitig an alle Teilnehmer, wird von Broadcast gesprochen. Wird nur eine Teilgruppe adressiert nennt man das Multicast. Broadcast ist in Netzen mit omni-direktionalen Ausbreitungsbedingungen innerhalb des Empfangsbereiches automatisch verfügbar. Jeder Teilnehmer kann direkt erreicht werden. In Netzen mit gerichteten Antennen muß u.U. jeder Teilnehmer einzeln adressiert werden. Das kostet zusätzliche Zeit und verringert die Übertragungskapazität des Netzwerkes.

Zwei Teilnehmer bilden eine Punkt-zu-Punkt-, mehrere Teilnehmer eine Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindung. Eine Single-Hop-Verbindung benötigt keine Zwischenstation(en), um Daten zwischen zwei Teilnehmern auszutauschen. In einer Multi-Hop-Verbindung erfolgt die Kommunikation zwischen zwei Teilnehmern über Zwischenknoten, um z.B. die Reichweite zu erhöhen oder eine gestörte Verbindung zu umgehen.

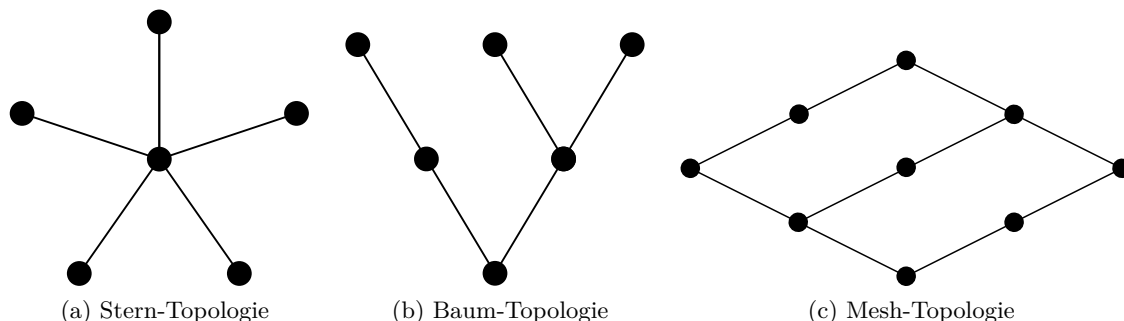


Abbildung 2.8: Typische Netzwerktopologien für drahtlose Szenarien

<sup>22</sup>AP - Access Point

<sup>23</sup>Backplane oder Wireless Distribution Network

### 2.7. Multiplexverfahren

Multiplexverfahren ermöglichen den gleichzeitigen Zugriff mehrerer Kommunikationsteilnehmer auf ein gemeinsames Übertragungsmedium. Dieses lässt sich durch Raum, Frequenz, Zeit und Code aufteilen<sup>24</sup> [11, 12]. Alle diese Verfahren lassen sich beliebig kombinieren.

#### 2.7.1. Raummultiplex - Space/Spatial Division Multiplex

Am einfachsten werden mehrere unabhängige Kommunikationsgruppen über den Raum bzw. den Abstand zu den anderen getrennt. Ist der Abstand groß genug, kann auf der gleichen Frequenz gleichzeitig interferenzfrei kommuniziert werden. Die räumliche Trennung kann auch durch Bündelung des Antennenstrahls erfolgen (MIMO<sup>25</sup> Systeme). Das erlaubt geringere Abstände zwischen den Kommunikationsgruppen.

#### 2.7.2. Frequenzmultiplex - Frequency Division Multiplex

Das Frequenzmultiplexverfahren unterteilt ein Frequenzband in mehrere Abschnitte (Kanäle). Mehrere unterschiedliche Signale werden auf die Frequenzen aufgeteilt und können so gleichzeitig übertragen werden. Das gewünschte Signal wird im Empfänger über die passende Trägerfrequenz ausgewählt (Rundfunk). Mehrere Teilnehmer können ungestört miteinander kommunizieren, wenn die Paare entsprechend auf die Kanäle verteilt werden.

Mit einer zusätzlichen räumlichen Trennung kann die Anzahl der benötigten Frequenzen verringert werden, indem benachbarte Räume immer unterschiedliche Frequenzen benutzen (Frequenzplanung) [13].

#### 2.7.3. Zeitmultiplex - Time Division Multiplex

Der Zugriff auf das Medium kann auch durch die Vorgabe des Zeitpunktes koordiniert werden. Dazu wird jedem Teilnehmer ein Zeitabschnitt (Slot), der sich wiederholen kann, zugewiesen. Die Identifikation des Teilnehmers erfolgt mit der Position des Zeitslots. Nachteil: Die Teilnehmer müssen zeitlich auf die Slotstruktur synchronisiert werden.

#### 2.7.4. Codemultiplex - Code Division Multiplex

Werden digitale Signale durch orthogonale Codes (z.B. Walsh-Codes) gespreizt, können diese im Empfänger durch die Nutzung derselben Codes wieder entspreizt und separiert werden. Somit ist durch die Nutzung mehrerer Codes eine gleichzeitig Übertragung mehrerer Datenströme möglich. Diese müssen untereinander nicht zeitlich synchronisiert sein, benötigen aber eine präzise Sendeleistungssteuerung in großen Zellen zur Vermeidung der Zellatmung.

### 2.8. Duplexverfahren

Duplexverfahren beschreiben die Richtungsabhängigkeit (Senden und Empfangen) der Kommunikationskanäle. Eine Simplex-Verbindung kann nur in eine Richtung übertragen (Rundfunk). Eine Halbduplex-Verbindung wechselt die Richtung der Kommunikation zwischen Senden und Empfangen. Dabei ist immer nur eine Richtung aktiv. Eine Vollduplex-Verbindung erlaubt gleichzeitig beide Richtungen.

---

<sup>24</sup>SDM - Space/Spatial Division Multiplex, FDM - Frequency Division Multiplex, TDM - Time Division Multiplex, CDM - Code Division Multiplex

<sup>25</sup>MIMO - Multiple-Input Multiple-Output

Werden Senden und Empfangen zeitlich getrennt, spricht man von Zeitduplex (TDD<sup>26</sup>). Werden Frequenzen für die Trennung der Richtungen benutzt, wird das Frequenzduplex (FDD) genannt. Eine Trennung der Richtungen durch Polarisierung der Antennenabstrahlung heißt Polarisationsduplex (PDD). TDD und FDD werden z.B. in der Mobilkommunikation kombiniert, indem das Senden auf einer Frequenz zu einem bestimmten Slot und das Empfangen auf einer anderen Frequenz in einem anderen Slot erfolgt.

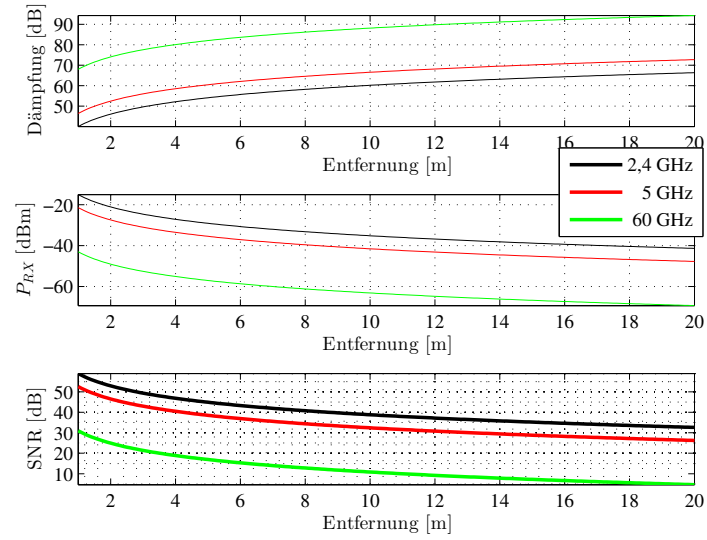
## 2.9. Zusammenfassung

Die drahtlose Übertragung digitaler Signale erfordert besondere Anstrengungen, um den Anforderungen an das Übertragungsmedium Luft gerecht zu werden. Abhängig vom Szenario und den Kanaleigenschaften müssen entsprechende Modulations- und Fehlerkorrekturverfahren angewendet werden. Je komplexer die Verfahren sind, desto größer ist der Einfluss auf die Latenz und auf den Ressourcenverbrauch in Hardware bzw. Software [14]. Die Verfügbarkeit hoher Bandbreiten unterstützt hohe Datenraten selbst mit wenigen Konstellationszuständen. Hier eignet sich insbesondere das lizenzfreie 60-GHz-mmWave-Band, das eine Bandbreite von bis zu 9 GHz bietet. Im Rahmen der Forschungsprojekte WIGWAM, EASY-A und PRELOCATE hat der Autor zur Entwicklung von mmWave-Übertragungssystemen mit Datenraten von mehreren Gigabit/s beigetragen. Hauptaugenmerk ist dabei der Entwurf der Medienzugriffssteuerung, um eine zuverlässige Übertragung der Datenpakete bei hohem Datendurchsatz und mit einer niedrigen Latenz zu gewährleisten. Die Grundlagen dazu werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

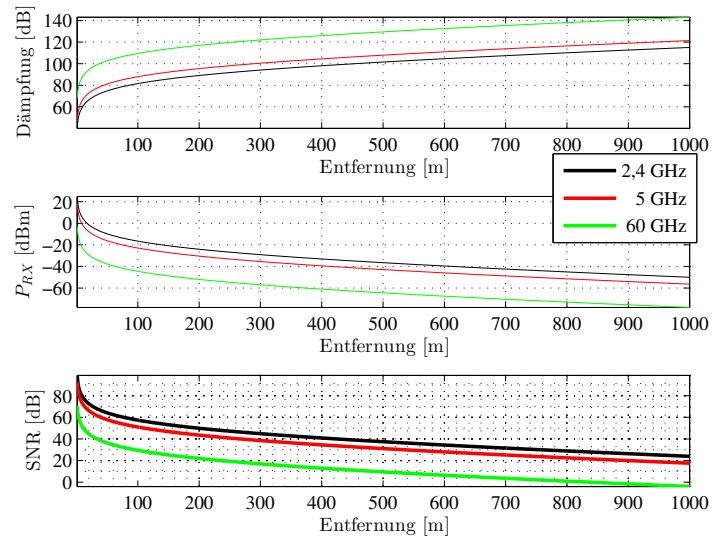
---

<sup>26</sup>TDD - Time Division Duplex, FDD - Frequency Division Duplex, PDD - Polarisation Division Duplex

## 2. Drahtlose Datenübertragung

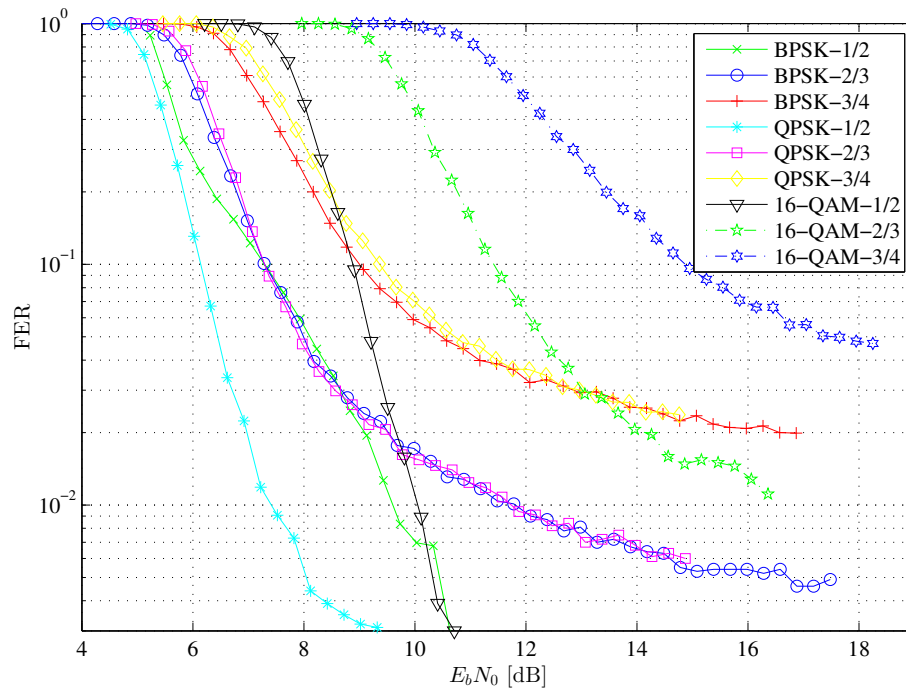


(a) Vivaldi-Antenne G=10 dBi mit TX-EIRP=15 dBm

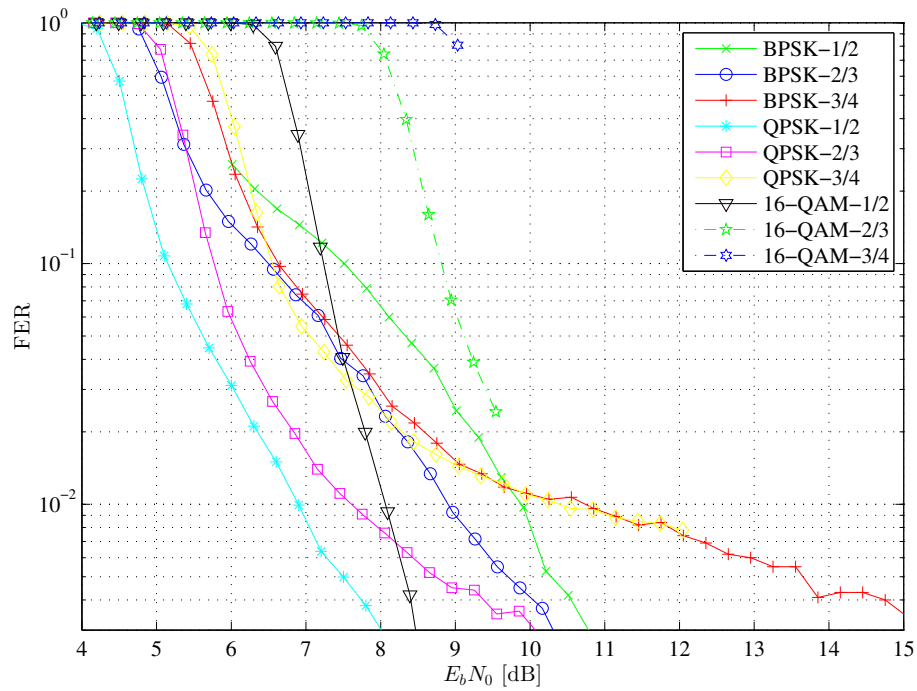


(b) Patch-Antenne G=30 dBi mit TX-EIRP=40 dBm

Abbildung 2.6: Kanalgewinn und SNR (über kurze und lange Distanz)



(a) ohne RS



(b) mit RS

Abbildung 2.7: FER vs.  $E_b N_0$  - Simulation EASY-A Basisbandprozessor mit CM1.2-Kanalmodell aus dem Standard IEEE 802.15.3c



### 3. Medienzugriffsprotokolle für drahtlose Netzwerke im 60-GHz-Band

Dieses Kapitel geht speziell auf die Medienzugriffsprotokolle bei der drahtlosen Nachrichtenkommunikation ein. Diese Verfahren werden der Datensicherungsschicht (OSI-Schicht 2) zugeordnet. Die IEEE unterteilt die letztgenannte Schicht für ihre LAN-bezogenen Standards in zwei Unterschichten: die logische Verbindungssteuerung (Schicht 2b) und die Medienzugriffssteuerung (Schicht 2a).

Eine Gegenüberstellung der Standardisierung von Medienzugriffsprotokollen im 60-GHz-Band stellt die eingesetzten Verfahren vor und bewertet deren Eignung für den Einsatz der im Kapitel 1.1 (Motivation) beschriebenen Szenarien und den Aufwand für die Implementierung in Hardware.

Die hochratige Datenübertragung setzt gerichtete Antennen voraus, um ein ausreichendes Link-Budget zu erhalten. Die mehr oder weniger starke Bündelung des Antennenstrahls beeinflusst die Art des Medienzugriffs der Kommunikationsteilnehmer. Für eine Datenübertragung müssen die Teilnehmer jeweils ihren Antennenstrahl auf den Kommunikationspartner ausrichten. Dazu benötigen sie Angaben zur Struktur/Topologie des Netzes (Positionen der Teilnehmer), die statisch vorgegeben bzw. dynamisch aktualisiert werden. Dienste der Wegsuche werden der Vermittlungsschicht (OSI-Schicht 3) zugeordnet und sind notwendig, wenn Pakete über andere Teilnehmer in einem vermaschten Netz geroutet werden müssen.

Bevor detailliert auf die Datensicherungsschicht eingegangen wird, gibt der nächste Abschnitt eine Übersicht der Aufgaben der Vermittlungsschicht.

#### 3.1. Vermittlungsschicht - Network layer

Die Vermittlungsschicht sorgt dafür, dass Datenpakete ihren Weg vom Sender zum Empfänger finden. Jeder Teilnehmer ist über eine *eindeutige netzwerkübergreifende Adresse* auswählbar. Der übergeordneten Schicht werden *verbindungslose* und *verbindungsorientierte Dienste* angeboten. Im verbindungslosen Modus wird jedes Paket separat zum Empfänger geroutet. Dem Router muß dazu jedes Ziel bekannt sein, um den richtigen Weg zu bestimmen. Dagegen wird im verbindungsbasierten Modus zuerst eine virtuelle Leitung (VC<sup>27</sup>) eingerichtet, d.h. es wird eine Kette von Zwischenstationen festgelegt, über die alle Pakete dieser Leitung transportiert werden. Der Empfänger wird nun über eine kürzere Leitungsnummer adressiert. Jeder beteiligte Router verwaltet dazu eine Tabelle der ein- und ausgehenden Verbindungen.

Ist der Empfänger kein Nachbar, also nicht in einem Schritt (Single-Hop) erreichbar, sondern nur über andere Teilnehmer/Knoten, spricht man von Multi-Hop. Die *Wegsuche* (*Routing*) vom Sender zum Empfänger basiert auf der Kenntnis der Netzwerktopologie. Diese wird statisch vorgegeben oder muß dynamisch erlernt werden. Ein Beispiel eines einfachen Routingalgorithmus ist der Distanz-Vektor-Routing-Algorithmus (DVR<sup>28</sup>) [15]. Jeder Router verwaltet eine Tabelle mit je einem Eintrag für jeden Router des Netzwerkes. Jeder Eintrag enthält den bevorzugten Ausgangsport für ein Ziel (Router) und die Kosten (Anzahl der Hops, Laufzeit, Bandbreite). Jeder Router verteilt diese Liste an alle Nachbarn. So erhält jeder Router die Informationen der anderen Router und aktualisiert die Einträge seiner Liste. Dabei wird ein fehlender Eintrag hinzugefügt oder bestehende ersetzt, sofern die Kosten geringer als die vorhandenen sind. Die Aktualisierung wird peri-

---

<sup>27</sup>VC - Virtual Circuit

<sup>28</sup>DVR - Distance Vector Routing Algorithm

odisch angestoßen. Eine Blockierung einer Route wird erst nach der Routenaktualisierung bekannt bzw. wenn ein Tabelleneintrag veraltet ist. Hier werden zusätzliche Maßnahmen benötigt, um schnell auf Änderungen der Verfügbarkeit zu reagieren (siehe Kapitel 5). In Netzen mit elektronisch gesteuerten Richtantennen (Beamsteering) kann erst kommuniziert werden, wenn die Position der benachbarten Teilnehmer bekannt ist. Ein geeigneter Suchalgorithmus wird in Abschnitt 5.3.2 vorgestellt.

Die gerichtete Übertragung erschwert zusätzlich Broadcast- und Multicast-Anwendungen, da jeweils nur ein Teilnehmer bedient wird. Jedes Paket muß einzeln nacheinander an alle Teilnehmer übertragen werden. Das reduziert die zur Verfügung stehende Bandbreite drastisch.

Eine weitere Aufgabe dieser Schicht ist die Anpassung der Paketlängen (Fragmentierung) bei der Übergabe an die untere Schicht und das Wiederausammenfügen zur Übergabe an die höhere Schicht.

Der Einsatz verbindungsorientierter Dienste verhindert Stau (congestion) in Netzwerkbereichen, indem nur neue Verbindungen erzeugt werden, wenn noch ausreichende Kapazitäten vorhanden sind (admission control). Überlastungen können auch vermieden werden, indem die Last (Traffic) auf verschiedene Routen aufgeteilt wird. In Fällen von Überlast oder baldiger Verstopfung müssen Pakete verworfen werden. Die Markierung der Pakete nach Wichtigkeit kann die Auswirkungen auf Paketverluste verringern. Kontrollpakete zur Routenaktualisierung sind wichtig für den Betrieb des Netzwerkes und sollten nicht verworfen werden. Ein MPEG-Datenstrom z.B. enthält u.a. Intra-Bilder und P-Bilder. Intra-Bilder sind Ankerbilder von denen P-Bilder abgeleitet werden und sind somit wichtiger, da bei fehlendem Intra-Bild alle folgenden P-Bilder verworfen werden müssen [16].

#### 3.1.1. Dienstgüte - Quality of Service

Anwendungen stellen spezielle Anforderungen an die Übertragung des Datenstroms (Flow). Diese Anforderungen lassen sich mit der Bandbreite (Datendurchsatz), der Verzögerung (Latenz), dem Jitter und dem tolerierbaren Paketverlust spezifizieren. Sie werden als Dienstgüte (QoS<sup>29</sup>) des Flows bezeichnet.

Die *Bandbreite* lässt sich sicherstellen, indem ein geeignetes Übertragungsverfahren ausgewählt wird. Hingegen ist die Verzögerung des Eintreffens der Pakete (Ende-zu-Ende-Verzögerung) u.a. abhängig von der Netzwerklast, der Anzahl der Flows, der Länge der zu übertragenden Pakete der Flows und der zur Verfügung stehenden Bandbreite. Dateiübertragungen sind nicht sensitiv gegenüber Verzögerungen, jedoch werden für Sprach- und Videoübertragungen maximal zulässige *Verzögerungen* vorgegeben. Variieren die Verzögerungen spricht man von *Jitter*. Der Einfluss von Latenz und Jitter wird am Beispiel eines Sprachausgabealgorithmus veranschaulicht: Werden die Daten blockweise aus einem Empfangspuffer ausgelesen, muß die Puffergröße an die Latenz des Ausgabealgorithmus angepaßt werden. Jitter erfordert eine Vergrößerung des Ein- bzw. Ausgabepuffers des Codecs<sup>30</sup>. Die Auswirkungen leicht verspäteter Pakete werden durch Puffern der Daten beseitigt bevor die Ausgabe gestartet wird. Leicht verfrühte Pakete erfordern ebenfalls größere Puffer, um nicht verworfen zu werden. Treffen mehrere Pakete zu spät ein, läuft der Ausgabepuffer leer und die (Sprach-)Ausgabe wird unterbrochen. Trifft ein einzelnes Paket zu spät ein muß es verworfen werden, da eine nachträgliche Ausgabe (der Sprache) sinnlos ist. Paketverluste können toleriert werden, sofern sie durch den Codec kaschierbar sind. Prinzipiell kann jedes verlorene Paket neu angefordert werden, sofern die Dienstgü-

---

<sup>29</sup>QoS - Quality of Service

<sup>30</sup>Codec: Verfahren, das Daten und Signale kodiert und dekodiert (Sprachcodec, Videocodec, Audiocodec)



Tabelle 3.1: Mapping zwischen 802.11e Access Categories (ACs) und 802.1Q CoS

Priorität	IEEE 802.1Q			IEEE 802.11e	
	PCP	Abkürzung	Verkehrsart	AC	Verkehrsart
kleinste	1	BK	Background	AC_BK	Background
	0	BE	Best Effort	AC_BE	Best Effort
	2	EE	Excellent Effort	AC_BE	Best Effort
	3	CA	Critical Applications	AC_VI	Video
	4	VI	Video	AC_VI	Video <100 ms
	5	VO	Voice	AC_VO	Voice <10 ms
	6	IC	Internetwork Control	AC_VO	Voice
höchste	7	NC	Network Control	AC_VO	Voice

tekriterien noch erfüllt werden.

Die Datenströme der Anwendungen werden normalerweise in vier Klassen eingeteilt: CBR<sup>31</sup> (z.B. für Telefonie), Real-Time-VBR<sup>32</sup> (z.B. komprimierte Videokonferenz), Non-Real-Time-VBR (z.B. Video-on-demand) und verbleibende Bandbreite (Best-Effort) (z.B. für Dateiübertragung, Webseitenabruf). Der IEEE-Standard für WLAN IEEE 802.11 nutzt die bereits erwähnten vier Klassen, IEEE 802.11Q hingegen definiert acht Klassen. Tabelle 3.1 zeigt die Zuordnungsvorschrift zwischen den beiden Standards. Sowohl IEEE 802.1Q als auch IEEE 802.11 sind der OSI-Schicht 2 zugeordnet. IEEE 802.1Q definiert die Markierung (Tagging) von Ethernetpaketen, um virtuelle Netzwerke (VLAN<sup>33</sup>) aufzubauen. In diesen Markierungen ist ein Feld für die Definition der *Class of Service* (CoS). So kann schon in Schicht 2 eine Aussage über die Priorität eines Paketes getroffen werden, ohne dass das Paket erneut klassifiziert werden muß. Hier wird bereits ersichtlich, dass QoS nicht nur eine Aufgabe der OSI-Schicht 3, sondern auch der Schicht 2 ist.

Wechselnde Ausbreitungsbedingungen z.B. durch blockierte Pfade bzw. heftige Regenschauer beeinflussen die Übertragungsparameter der Verbindung. Eine Routenänderung kann die Ende-zu-Ende-Verzögerung z.B. durch zusätzliche Hops beeinflussen. Änderungen der Modulation und der Fehlerkorrektur beeinflussen die Datenrate. Das hat zur Folge, dass ein Datenstrom z.B. anhand der Priorität unterbrochen werden muß, um die Dienstgüte anderer Datenströme z.B. mit höherer Priorität weiter garantieren zu können.

### 3.1.2. Traffic-Shaping (Verkehrsformung)

Ein eingehender Datenstrom lässt sich u.a. durch die mittlere Datenrate und die Form (Shape: Frequenz, Länge) unterscheiden. Eine konstante Bitrate (CBR) wird z.B. bei unkomprimierten Vollduplex-Sprachverbindungen generiert. Werden Videodaten komprimiert, so entsteht eine variable Datenrate, die abhängig vom Bildinhalt ist. Webseitenabrufe erzeugen unregelmäßige/stoßweise Blöcke von Paketen (Bursts) als Antwort. Die Eingangspuffer eines Kommunikationssystems werden so dimensioniert, dass interne Verarbeitungsverzögerungen sowie kurzzeitige Übertragungsausfälle überbrückt werden können. Konstante und leicht variierende Datenraten werden so automatisch unterstützt. Bursts hingegen müssen abgefangen werden, da sie sonst die verfügbaren Pufferressourcen im Übertragungssystem überlasten würden, obwohl alle Pakete noch mit der angeforderten Bandbreite hätten übertragen werden können. Ein Traffic-Shaper reguliert die ein- bzw.

<sup>31</sup>CBR - Constant Bit Rate

<sup>32</sup>VBR - Variable Bit Rate

<sup>33</sup>VLAN - Virtual Local Area Network

ausgehende Datenrate der Anwendung auf ein Maximum und verhindert so Paketverlust. Ein Traffic-Shaping-Algorithmus kann z.B. durch einen *leaky bucket* bzw. *token bucket* Algorithmus erfolgen und lässt sich sehr leicht in Hard- und Software implementieren. Es werden keine Rückmeldungen (Flow Control) des Empfängers genutzt [16].

#### 3.1.3. Packet Scheduler (Paketplaner)

Die einfachste Ausgabesteuerung benutzt einen Puffer, der auf dem *First-In-First-Out* (FIFO) bzw. *First-Come-First-Serve* (FCFS) Prinzip basiert. Die Pakete werden nach ihrem Eintreffen in den Puffer eingestellt und jeweils in dieser Reihenfolge auch wieder ausgegeben. Bei vollem Puffer werden neu ankommende Pakete verworfen. Datenströme mit großen Paketen füllen den Puffer schneller und beeinflussen so die anderen Datenströme.

Priorisierte Datenströme können z.B. in mehreren Warteschlangen (Queues) je nach Priorität gespeichert werden. Der Packet-Scheduler berücksichtigt die Priorität bei der Ausgabe der Pakete. Pakete mit höherer Priorität werden zuerst ausgegeben. Niedrig priorisierte Pakete verbleiben u.U. im Puffer, wenn immer höherpriorisierte Pakete in der Warteschlange verfügbar sind.

Ein einfacher bandbreitenbasierter fairer Scheduling-Algorithmus ist der *Round-Robin* (RR) Algorithmus. Jeder Datenstrom wird einem separaten Puffer zugeordnet. Jeder Puffer wird abwechselnd nacheinander bedient, d.h. sind Pakete im Puffer wird jeweils ein Paket ausgegeben und zum nächsten Puffer gewechselt. Größere Pakete bekommen dadurch mehr Bandbreite. Dieser Nachteil wird durch den *Fair Queueing* (FQ) Algorithmus beseitigt. Dabei werden die Pakete in den Puffern byte-weise betrachtet und die Endzeiten berechnet, in dem das jeweilige Paket fertig ausgegeben wäre. Die Startzeit ist jeweils die Endzeit des vorherigen Paketes bzw. die Ankunftszeit, wenn die Queue leer ist. Die Endzeiten werden dann sortiert und die Pakete entsprechend der Reihenfolge der Endzeiten ausgegeben. Jeder Puffer wird nun mit der gleichen Priorität ausgegeben. Soll ein Puffer schneller ausgegeben werden, wird der *Weighted Fair Queueing* (WFQ) Algorithmus benutzt. Dieser kann auch für die priorisierte Ausgabe von Datenströmen genutzt werden, indem die Ausgabebandbreite der Puffer entsprechend der Priorität gewichtet werden. Ein Nachteil von FQ und WFQ ist die Sortierung der Endzeiten. Für  $N$  Datenströme sind pro Paket  $O(\log(N))$  Operationen notwendig, um die Zielzeiten neu zu sortieren. Der *Deficit Round Robin* (DRR) benötigt nur eine Operation per Paket, was sich vorteilhaft auf die Implementierung in Hardware auswirkt [17]. Implementierungsvorschläge werden u.a. in [18, 19] vorgestellt.

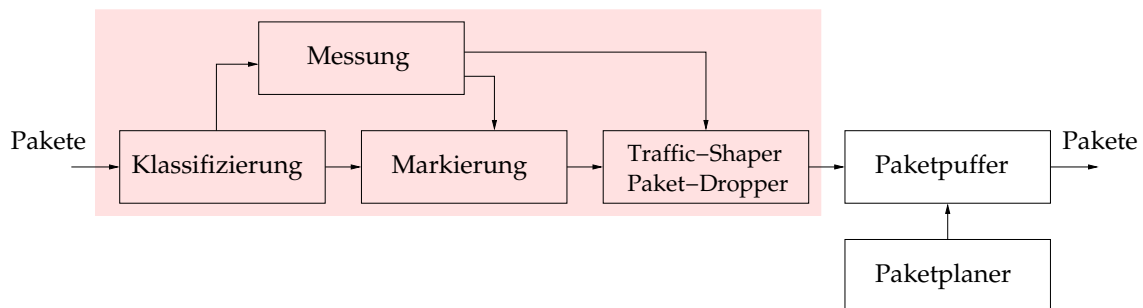


Abbildung 3.1: Weiterleitung eines Paketes über den Traffic-Shaper und den Paketplaner

Abbildung 3.1 zeigt die Komponenten zur Sicherstellung der Dienstgüte. Am Eingang wird das Paket klassifiziert z.B. mit Hilfe des CoS-Feldes des VLAN-Tags. Gleichzeitig werden die Parameter der Datenrate (minimale, mittlere, maximale, Burstrate) gemessen.

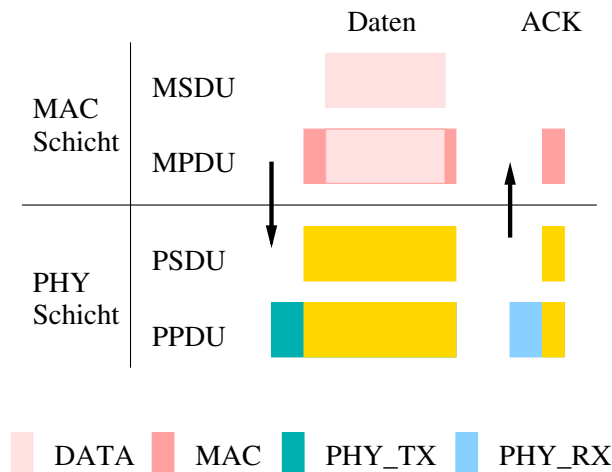


Abbildung 3.2: Schichtenweise Datenkapselung

Entsprechend der Klassifizierung und der gemessenen Parameter wird das Paket markiert und vom folgenden Traffic-Shaper geformt bzw. gelöscht, falls die vereinbarten Kriterien des Datenstroms (SLA<sup>34</sup>) nicht eingehalten werden. Ein Paketplaner stellt die entsprechende priorisierte Ausgabereihenfolge her.

### 3.2. Datensicherungsschicht - Data Link Layer

Die Datensicherungsschicht definiert eine Diensteschnittstelle zur Vermittlungsschicht, behandelt Übertragungsfehler und reguliert den Datenfluss, so dass die Puffer im Empfänger nicht überlaufen. Es werden die Dienste der OSI-Schicht 1 genutzt, um Daten zu übertragen oder zu empfangen.

Ein Datenpaket betritt die Schicht als Service Data Unit (SDU) und verlässt sie, um zusätzliche schichtspezifische Protokollsteuerinformationen (Frame encapsulation) ergänzt, als Protocol Data Unit (PDU). In der MAC-Schicht heißen diese Pakete MSDU bzw. MPDU und PSDU bzw. PPDU in der Bitübertragungsschicht. In Empfangsrichtung laufen die Kapselungsprozesse umgekehrt ab. Abbildung 3.2 zeigt ein Beispiel der Datenkapselung zwischen der MAC- und der PHY-Schicht und umgekehrt. Die übergebenen Daten (SDU) werden durch die unteren Schichten nicht interpretiert. Die Parametrisierung erfolgt über zusätzliche Informationen bei der Übergabe. Im ersten Teil wird ein Datenpaket zum Senden verpackt und im zweiten Teil wird die empfangene Bestätigung (ACK<sup>35</sup>) entpackt. Die Bestätigung verbleibt in der MAC-Schicht.

#### 3.2.1. Logische Verbindungssteuerung - Logical Link Control

Die logische Verbindungssteuerung (LLC<sup>36</sup>) als oberer Teil der Datensicherungsschicht wird im IEEE-Standard 802.2 spezifiziert und stellt der Vermittlungsschicht drei medienunabhängige Dienste zur Verfügung: einen *unbestätigten verbindungslosen* Dienst (LLC 1), einen *verbindungsorientierten* Dienst (LLC 2) und einen *bestätigten verbindungslosen* Dienst (LLC 3).

Der erste Dienst unterstützt Punkt-zu-Punkt-, Multicast- und Broadcast-Übertragungen und die letzten beiden Dienste benutzen Punkt-zu-Punkt-Übertragungen mit Empfangs-

<sup>34</sup>SLA - Service Level Agreement

<sup>35</sup>ACK - Acknowledgment

<sup>36</sup>LLC - Logical Link Control

bestätigungen. Der Standard definiert die Steuerpaketformate für den Aufbau, den Abbau, das Wiederaufsetzen und die Neuzuweisung der Verbindung. Dienstekennungen (Service Access Points) unterstützen das Multiplexen unterschiedlicher Datenströme, d.h. es werden mehrere Datenströme gleicher oder unterschiedlicher Dienste vor dem Senden in einen Datenstrom verschachtelt an die untere Schicht übergeben und nach dem Empfang wieder getrennt an die höhere Schicht übergeben.

#### 3.2.2. Fehlererkennung

Datenbits können bei der Übertragung verfälscht werden. Das hat zur Folge, dass das zugehörige Datenpaket verworfen werden muß. Um diese Fehler zu erkennen wird eine Prüfsumme z.B. eine CRC<sup>37</sup> über das Datenpaket berechnet und mitgesendet. Im Empfänger wird die Prüfsumme über die empfangenen Datenbits Neuberechnet und mit der mitgesendeten verglichen. Bei Nichtübereinstimmung kann das Paket mit den Verfahren der *Rückwärtsfehlerkorrektur* neu übertragen werden. Die *Vorwärtsfehlerkorrektur* reduziert das Auftreten von Bitfehlern durch das Hinzufügen von Redundanz. In Kommunikationssystemen mit Rückkanal werden auch beide Verfahren kombiniert.

#### 3.2.3. Vorwärtsfehlerkorrektur

Die Vorwärtsfehlerkorrektur (FEC<sup>38</sup>) erfolgt durch die Kanalkodierung und ist Teil der Bitübertragungsschicht. Dabei wird den zu übertragenden Daten Redundanz hinzugefügt, um eine Rekonstruktion fehlerhafter Bits im Empfänger durchzuführen.

Es wird zwischen strombasierten und blockbasierten Verfahren unterschieden. Zu den strombasierten Verfahren zählt der Faltungscod (CC<sup>39</sup>), der z.B. mit dem Viterbi-Algorithmus dekodiert wird [20]. Faltungscodes entfalten ihre Stärke bei der Korrektur von Einzelbitfehlern und werden deshalb zusammen mit einem Interleaver eingesetzt, um auch Burstfehler dekodieren zu können. Der LDPC<sup>40</sup>-Code zählt zu den blockbasierten Verfahren und benutzt eine leicht besetzte (sparse) Paritätsprüfmatrix für die Berechnung des redundanten Teils [21]. Das Reed-Solomon (RS) Verfahren ist ebenfalls ein blockbasiertes Verfahren, das sich besonders für die Korrektur von Burstfehlern eignet. Eine Kombination durch das Verketteten mehrerer Verfahren ist auch möglich. Dabei werden die Daten z.B. zuerst mit dem RS (outer code) und dann mit einem Faltungscod (inner code) kodiert. Die Verfahren werden nach der Leistung (*coding gain*) und der Restfehlerwahrscheinlichkeit klassifiziert. Weitergehende Ausführungen sind in [11, 22] zu finden.

#### 3.2.4. Rückwärtsfehlerkorrektur

Tritt dennoch ein Übertragungsfehler auf, kann das Paket neu angefordert werden. Das geschieht durch das Ausbleiben einer positiven Bestätigung nach Ablauf einer bestimmten Zeit im Sender bzw. mit einer expliziten Aufforderung zur Übertragungswiederholung (negative Bestätigung) durch den Empfänger. Erreicht eine positive Bestätigung nicht den ursprünglichen Sender des Paketes, wird das Paket neu versendet. *Aktive* Bestätigungen erfordern eine Übertragung an den Sender. In omni-direktionalen Multi-Hop-Szenarien besteht auch die Möglichkeit *passiv*, durch Abhören des Kanals auf Weiterleitungen des gesendeten Paketes an andere Knoten, auf eine erfolgreiche Übertragung zu schließen.

---

<sup>37</sup>CRC - Cyclic Redundancy Check

<sup>38</sup>FEC - Forward Error Correction

<sup>39</sup>CC - Convolutional Code

<sup>40</sup>LDPC - Low-Density-Parity-Check

Doppelt empfangene Pakete dürfen nicht die Vermittlungsschicht erreichen. Das wird mit Hilfe einer Paketnummerierung (Sequenznummern) verhindert. Dazu muß der Empfänger eine Sequenznummernliste mit bereits empfangenen Paketen verwalten.

Nachfolgend werden Fehlerkorrekturverfahren nach aufsteigender Komplexität vorgestellt. Diese Verfahren können in mehreren Schichten auch gleichzeitig angewendet werden. Schicht 3 stellt eine Ende-zu-Ende-Semantik her, so dass Bestätigungen über mehrere Hops übertragen werden. Bestätigungen der Schicht 2 werden nur zwischen zwei Knoten auf direktem Weg (Single-Hop) ausgetauscht. Verfahren, die nach dem Senden eines Paketes auf eine Bestätigung warten und im Fehlerfall eine Neuübertragung durchführen, werden auch als ARQ<sup>41</sup>-Protokolle bezeichnet. Weitere Ausführungen sind in [16] zu finden.

#### Stop-and-Wait

Hierbei wird ein Paket gesendet und anschließend wird auf ein Bestätigungspaket gewartet. Eine Bestätigung kann auch ein Datenpaket sein. Wenn innerhalb einer festgelegten Zeit kein Bestätigungspaket eintrifft, wird das Paket erneut versendet.

#### Go-back-N

Der Sender darf mehrere Pakete hintereinander senden, ohne auf eine Bestätigung warten zu müssen. Jedes Paket erhält eine aufsteigende Sequenznummer. Der Empfänger kann mehrere erfolgreich übertragene Pakete kumulativ bestätigen, indem die letzte Sequenznummer  $N_{succ}$  eines zusammenhängenden Blockes übertragen wird. Die Anzahl der zu sendenden Pakete wird durch ein Fenster der Größe  $S$  bestimmt. Der Start des Fensters wird mit  $N_S$  gekennzeichnet. Sind alle Pakete mit den Sequenznummern  $N_S$  bis  $N_S + S - 1$  gesendet, muß auf eine Bestätigung gewartet werden. Eine Empfangsbestätigung stellt den Fensterstart des gleitenden Fensters (Sliding Window) auf  $N_{succ} + 1$  weiter. Bleibt eine Empfangsbestätigung aus wird noch einmal vom Fensterstart  $N_S$  begonnen.

Ein Übertragungsfehler hat zur Folge, dass alle nachfolgenden erfolgreich übertragenen Pakete verworfen und neu übertragen werden müssen. Weiterhin müssen die Pakete im Sender bis zur Bestätigung für eine eventuelle Neuübertragung vorgehalten/gespeichert werden. Die Puffergröße ist abhängig von der Fenstergröße und der maximalen Paketlänge.

#### Selective Repeat Request

Die komplette Neuübertragung im *Go-back-N*-Protokoll kann durch eine selektive Neuübertragung fehlender Pakete verhindert werden. Negative Bestätigungen (NAK<sup>42</sup>) melden die fehlerhaft übertragenen Pakete zurück. Positive Bestätigungen (ACK) enthalten eine Liste der erfolgreich übertragenen Pakete.

Dieses Verfahren setzt zusätzlich ein gleitendes Fenster im Empfangspuffer voraus, sofern die Pakete in der gleichen Reihenfolge ausgegeben werden sollen. Auch hier ist die Puffergröße wieder von der Fenstergröße und der maximalen Paketlänge abhängig.

#### 3.2.5. Datenflusssteuerung

Die Datenflusssteuerung verhindert ein Überlaufen der Empfangspuffer. Dabei wird zwischen raten- und fensterbasierten Verfahren unterschieden. Ratenbasierte Verfahren limitieren die maximale Datenrate des Senders ohne Rückinformationen (siehe Abschnitt

---

<sup>41</sup>ARQ - Automatic Repeat Request

<sup>42</sup>NAK - Negative Acknowledgement

### 3. Medienzugriffsprotokolle für drahtlose Netzwerke im 60-GHz-Band

3.1.2). Fensterbasierte Verfahren benutzen Start/Stop-, Sliding-Window- oder kreditbasierte Protokolle. Im Ethernet-Protokoll werden z.B. so genannte Pause-Pakete gesendet, um den Datenfluss des Senders zu regulieren [23].

#### 3.2.6. Anpassung der Paketgrößen

Bevor ein Paket an die Bitübertragungsschicht übergeben wird, muß die Paketlänge angepaßt werden. Zum einen muß ein Paket u.U. noch weiter zerlegt werden (Fragmentierung), um die Übertragungschancen bei schlechten Kanalverhältnissen zu erhöhen. Zum anderen werden Pakete zu einem größeren zusammengefaßt (Aggregation), um die Effizienz bei der Übertragung zu steigern. Ausführliche Erläuterungen zur Fragmentierung und Aggregation erfolgen im Kapitel 4.

### 3.3. Medienzugriffssteuerung - Medium Access Control (MAC)

Greifen mehrere Teilnehmer gleichzeitig auf das Medium bzw. den Kanal zu, entstehen Kollisionen, sofern sich die Teilnehmer in Hörreichweite befinden. Die Medienzugriffssteuerung als unterer Teil der Datensicherungsschicht versucht diese Kollisionen zu vermeiden. Im Folgenden werden wichtige Verfahren vorgestellt, die speziell auf die Belange des drahtlosen Mediums Luft eingehen. Gerichtete Antennen verhindern wiederum den Einsatz dieser Verfahren bzw. erfordern zusätzliche Mechanismen, auf die anschließend eingegangen wird. Erläuterungen zu Reservierungsverfahren z.B. zum Durchsetzen von Dienstgüteanforderungen beenden den Abschnitt.

#### 3.3.1. Medienzugriffsverfahren

Im drahtlosen Medium gibt es im Vergleich zum drahtgebundenen einige Nachteile. Die *Empfangsleistung* nimmt quadratisch zur Entfernung ab (siehe Abschnitt 2.5), d.h. es stehen begrenzte Reichweiten zur Verfügung. Die *Fehlerrate* bei drahtloser Übertragung ist deutlich höher.

Der Sender kann *keine Kollisionserkennung* durchführen, da sich Kollisionen am Empfänger auswirken und die eigene Sendeleistung das Empfangen entfernter Signalquellen verhindert.

Einfache Medienzugriffsprinzipien wurden bereits im Abschnitt 2.7 auf Seite 18 vorgestellt. In Bezug auf die ungenutzte Bandbreite sind diese jedoch ineffizient. Finden keine Übertragungen statt, kann der Raum, die Zeit oder die Frequenz nicht anderen Nutzern zur Verfügung gestellt werden. Dementsprechend werden komplexere Verfahren benötigt, um die vorhandene Bandbreite effizient auf die Nutzer aufzuteilen.

Der Zugriff auf das Medium kann *wettbewerbsbasiert* (contention-based) und *wettbewerbsfrei* (contention-free) stattfinden. Die wettbewerbsbasierten Verfahren benötigen keine zusätzliche Infrastruktur und werden verteilt koordiniert. Wettbewerbsfreie Verfahren nutzen einen Koordinator (Master/Access Point) für die Zuteilung der Ressourcen.

##### 3.3.1.1. Wettbewerbsbasierte Zugriffsverfahren

Die einfachste Möglichkeit auf den Kanal zuzugreifen ist zu senden, wenn Daten zur Verfügung stehen. Dieses Verfahren heißt *ALOHA*, wurde 1970 vorgestellt und ermöglicht einen Datendurchsatz von maximal 18% des Möglichen [24]. Die Erweiterung *slotted-ALOHA* teilt die Zeit in Abschnitte ein und erlaubt das Senden nur am Anfang eines Zeitabschnittes. Das steigert den Datendurchsatz auf maximal 37% [25].

### 3.3. Medienzugriffssteuerung - Medium Access Control (MAC)

Befinden sich die Teilnehmer in Hörreichweite<sup>43</sup> kann der Kanal vor dem Senden abgehört werden<sup>44</sup>. Gesendet wird erst, sobald der Kanal frei ist (1-persistent CSMA<sup>45</sup>). Nonpersistent CSMA wiederholt den Sendeversuch bei belegtem Kanal nach einer zufälligen Zeit.  $p$ -persistent CSMA teilt die Zeit nach einer Übertragung in Abschnitte (contention slots) ein. Wird der Kanal frei, so wird mit der Wahrscheinlichkeit  $p$  gesendet und mit  $(1 - p)$  auf den nächsten Slot gewartet. Wenn der Kanal in diesem Slot auch frei ist wiederholt sich dasselbe Verfahren, bis die Übertragung gestartet wurde oder der Kanal (Slot) belegt ist.

Bei diesen Verfahren machen sich Signallaufzeiten negativ bemerkbar, da ein Kanal beim Sender zum Zeitpunkt des Abhörens noch nicht belegt ist, wenn eine entfernte Übertragung bereits gestartet wurde. Das letztere Verfahren dehnt das Abhören auf einen Slot aus. Die Slotlänge muß die Signallaufzeiten des Mediums berücksichtigen<sup>46</sup>.

Trotzdem bleibt eine Restwahrscheinlichkeit, dass Übertragungen kollidieren. Weitere Ausführungen finden sich hierzu z.B. in [16].

**Carrier Sensing (CS) - Clear channel assessment (CCA)** Das Abhören des Kanals kann durch Detektion der Signalleistung direkt am analogen Empfänger-Frontend erfolgen. Die Leistung des Signals wird über eine gewisse Zeit gemittelt und gewöhnlich als RSSI<sup>47</sup> an den MAC übergeben. Verzögerungen ergeben sich durch die Mittelung der digitalisierten Signalwerte. In einer frame-basierten Kommunikation wird der Anfang eines Frames gewöhnlich über eine Präambel detektiert. Die Detektion der Präambel kann auch als Indikator für einen belegten Kanal genutzt werden. Verzögerungen ergeben sich aus der Länge der Präambel und der Dauer der Präambelverarbeitung. Schließlich kann auch die Dekodierung des PHY-Headers oder des MAC-Headers des Frames abgewartet werden. Das RSSI ist unabhängig vom verwendeten Übertragungsverfahren, hat aber den Nachteil, dass eine Schwelle definiert werden muß, ab der ein Kanal als belegt gilt. Die Detektierung einer Präambel bzw. die Dekodierung eines Frames/Headers benötigt Teile des digitalen Basisbandprozessors und funktioniert nur für das eingesetzte Übertragungsverfahren.

Da im drahtlosen Kanal keine Kollisionserkennung durch den Sender möglich ist, wird eine Kollisionsvermeidung angestrebt. Die begrenzte Reichweite begünstigt Effekte wie die versteckten oder ausgelieferten Endgeräte, die im Folgenden vorgestellt werden.

**Versteckte Endgeräte (Hidden Nodes)** Ein verstecktes Endgerät  $C$  befindet sich außerhalb der Reichweite des Knotens  $A$ , aber in Reichweite des Knotens  $B$ . Da  $A$  eine Übertragung von  $C$  nicht hört, sendet  $A$  nach  $B$ . Eine gleichzeitige Übertragung von  $C$  nach  $B$  wird so gestört. Das MACA<sup>48</sup>-Protokoll löst dieses Problem durch Einführung von zusätzlichen Steuerpaketen und wurde 1990 in [26] vorgestellt.  $A$  sendet ein RTS-Paket an  $B$ .  $B$  antwortet mit einem CTS-Paket. Da  $C$  sich in Reichweite von  $B$  befindet, empfängt es das CTS-Paket und weiß nun, dass der Kanal durch  $A$  belegt ist. Eine Erweiterung des MACA-Protokolls ist MACAW (MACA for Wireless) und wurde 1994 in [27] publiziert. Jedes Paket wird nun mit einem ACK-Paket bestätigt, so dass Übertragungsfehler schon auf MAC-Ebene korrigiert werden. Weiterhin wird CSMA eingesetzt, um den Zugriff benachbarter Stationen zu koordinieren. Das Backoff-Verfahren (siehe Abschnitt 3.3.1.1)

<sup>43</sup>Bei einem Kabel befinden sich alle Teilnehmer in Hörreichweite.

<sup>44</sup>CS - Carrier Sense

<sup>45</sup>CSMA - Carrier Sense Multiple Access

<sup>46</sup>Signallaufzeit in der Luft bei 1 km:  $t_l = 1000 \text{ m}/c_0 = 3,336 \mu\text{s}$  bei 10 m:  $t_l = 0,033 \mu\text{s}$

<sup>47</sup>RSSI - Received Signal Strength Indicator

<sup>48</sup>MACA - Multiple Access with Collision Avoidance

### 3. Medienzugriffsprotokolle für drahtlose Netzwerke im 60-GHz-Band

wird nun für jeden Datenstrom eines Sender-Empfänger-Paares eingesetzt, um die Fairness zu erhöhen. Dazu wird eine separate Queue für jeden Datenstrom erstellt. Vor jedem Kanalzugriff führen die Queues untereinander ein Backoff-Verfahren durch, d.h. sie müssen sich für den eigentlichen Zugriff bewerben.

**Ausgelieferte Endgeräte (Exposed Nodes)**  $A$  ist in Reichweite zu  $B$  und  $D$ .  $C$  ist in Reichweite zu  $B$  aber nicht zu  $A$ .  $D$  ist nur in Reichweite zu  $A$ .  $B$  sendet nach  $C$ . Will nun  $A$  nach  $D$  senden sieht es einen belegten Kanal und wartet auf das Ende der Übertragung.  $A$  ist ein ausgeliefertes Endgerät.

**Nah-/Ferneffekt (Near Far Problem)** Ein weiteres Problem entsteht, wenn zwei Teilnehmer ( $B$  und  $C$ ) gleichzeitig  $A$  kontaktieren. Wenn  $B$  einen kürzeren Abstand zu  $A$  hat, dann wird aufgrund der stärkeren Empfangsleistung nur  $B$  gehört. Das hat großen Einfluss auf die Fairness, da weiter entfernte Stationen schlechter bzw. gar nicht bedient werden.

**Distributed Coordination Function (DCF)** Aktuelle Standardisierungen nutzen die DCF für den wettbewerbsbasierten Zugriff auf den Kanal. Grundlage ist CSMA mit Kollisionsvermeidung (CA<sup>49</sup>). Nach dem Abhören bzw. Freiwerden des Kanals wird erst nach einer Wartezeit (IFS<sup>50</sup>) mit dem eigentlichen Backoff-Verfahren für die Datenübertragung begonnen. Wird innerhalb des IFS der Kanal als belegt erkannt, gilt das als fehlgeschlagener Sendeversuch. Für alle normalen Datenübertragungen wird das längste IFS, das DIFS<sup>51</sup>, genutzt. Höher priorisierte Pakete wie Antwortpakete (ACK, CTS) werden grundsätzlich nach einem SIFS<sup>52</sup> gesendet. Die *Point Coordination Function* des IEEE-802.11-Standards [7] benutzt das PIFS<sup>53</sup> für ein zentral gesteuertes Zugriffsverfahren (Polling). Die zeitliche Beziehung der IFS ist in Abbildung 3.6 auf Seite 39 dargestellt.

Das Mitsenden der Kanalbelegungsdauer ermöglicht anderen Teilnehmern ein virtuelles „Carrier Sensing“, indem sie mitgehörte Pakete auswerten und den NAV<sup>54</sup> aktualisieren. Abbildung 3.3 zeigt eine Kommunikation mit RTS- und CTS-Paketen und den dazugehörigen NAVs. Nach dem RTS-Paket werden alle folgenden Pakete (Daten und ACK) nach einem SIFS gesendet. Zusätzlich wird nach jedem Paket der NAV aktualisiert.

**Wettbewerbsfenster (Backoff)** Verstreicht die Zeit DIFS beginnt das Backoff-Verfahren. Bevor ein neues Paket gesendet wird, würfelt jede Station eine Zeit aus dem Bereich des Wettbewerbsfensters (Contention Window). Ist der Kanal vor Ablauf der Backoff-Zeit belegt, wird die verbleibende Zeit gespeichert und als Backoff-Zeit für den nächsten Wettbewerb genutzt. So werden Stationen bevorzugt, die schon länger auf eine Übertragung warten. Das *binary exponential Backoff* Verfahren verdoppelt das Wettbewerbsfenster nach jedem erfolglosen Sendeversuch bis zu einem Maximalwert. Eine erfolgreicher Sendeversuch setzt das Fenster wieder auf den initialen Wert.

---

<sup>49</sup>CA - Collision Avoidance

<sup>50</sup>IFS - Inter Frame Space

<sup>51</sup>DCF IFS

<sup>52</sup>SIFS - Short IFS

<sup>53</sup>PIFS - Point Coordination Function IFS

<sup>54</sup>NAV - Network Allocation Vector



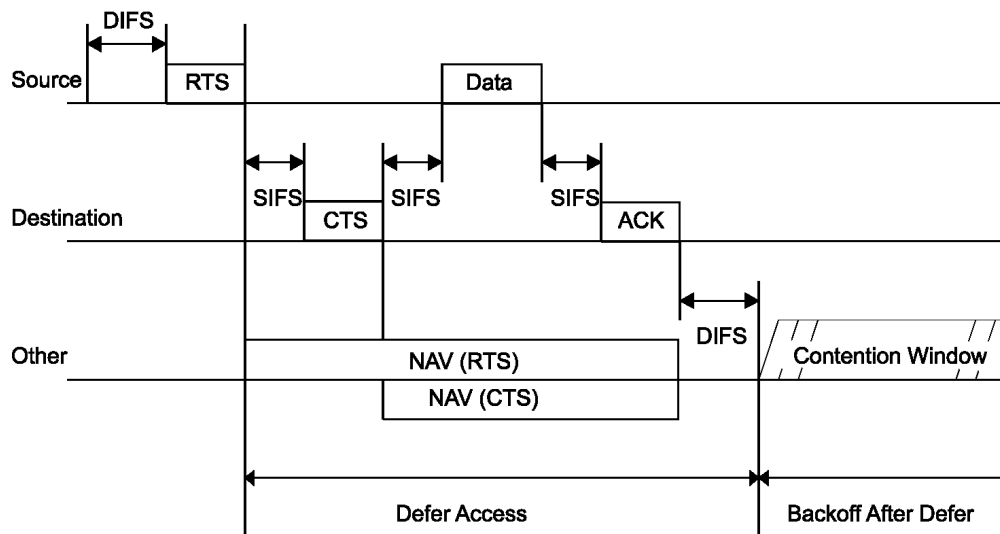


Abbildung 3.3: DCF mit IFS und NAV [7]

#### 3.3.1.2. Wettbewerbsfreie Zugriffsverfahren

Der kollisionsfreie Zugriff muß über eine Instanz (Master / Access Point) gesteuert werden. Die Teilnehmer greifen nicht mehr wahlfrei (wie bei DCF) auf den Kanal zu, sondern werden über diese Instanz abgefragt (Polling) bzw. eingeplant (Scheduling), zu welchem Zeitpunkt und wie lange sie den Kanal belegen dürfen. Polling und Scheduling garantieren Dienstgütekriterien.

**Polling** Jeder Teilnehmer wird der Reihe nach vom Master mit Paketen beliefert und aufgefordert, vorhandene Daten zu senden. Polling erfordert immer einen initialen Datenverkehr, damit der Slave senden darf, selbst wenn der Master keine Daten zum Senden hat. Anhand der Zugriffsfrequenz und der Menge der zu übertragenden Daten lassen sich der Datendurchsatz und die Latenz steuern.

**Scheduling** Grundlage für die Zugriffsplanung sind die angeforderten Ressourcen und Dienstgütekriterien der Teilnehmer. Dazu muß jeder Datentrom mit Quelle, Ziel und den QoS-Parametern spezifiziert werden. Anhand dieser Informationen kann der Scheduler den Zugriff aller Teilnehmer planen und übermittelt danach die jeweiligen Zugriffsparameter (Startzeit, Dauer, Modulation) an die Teilnehmer.

#### 3.3.1.3. Reservierungsverfahren/Ressourcenmanagement

Reservierungsverfahren erlauben die Bereitstellung von Dienstgütekriterien, indem sie die Ressourcen entsprechend den Anforderungen aufteilen. Die Reservierung kann zentral bzw. dezentral koordiniert werden. Bei ersterem sendet der Teilnehmer den Reservierungswunsch an einem vorher festgelegten Koordinator. Dieser entscheidet anhand der aktuellen Situation und den administrativen Vorgaben, ob die geforderten Kriterien erfüllt werden können und dürfen. Eine anschließende Bestätigung oder Ablehnung vervollständigt das Protokoll. Verteilte Verfahren müssen alle Teilnehmer in die Entscheidungsfindung einbeziehen bzw. begrenzen die Reservierung auf die Stationen in Übertragungsreichweite.

### 3. Medienzugriffsprotokolle für drahtlose Netzwerke im 60-GHz-Band

Oft werden wettbewerbsbasierte (kollisionsbehaftete) Verfahren für den Reservierungsteil eingesetzt. Die eigentliche Datenübertragung läuft dann aber kollisionsfrei. Im Folgenden werden exemplarisch drei Reservierungsverfahren für den omni-direktionalen Zugriff vorgestellt [12, 15].

**DAMA - Demand Assigned Multiple Access (Reservation ALOHA)** Der Kanal ist in eine Wettbewerbs- und Datenübertragungsphase eingeteilt. Jeder Teilnehmer überträgt in der Wettbewerbsphase (slotted ALOHA) seinen Reservierungswunsch an den Koordinator. Kollisionen können nur in dieser kurzen Phase auftreten. Die erfolgreichen Reservierungen werden dann an die Teilnehmer übermittelt. Diese greifen dann kollisionsfrei innerhalb der Datenübertragungsphase auf den Kanal zu. Jeder Zeitabschnitt muß explizit reserviert werden.

**PRMA - Packet Reservation Multiple Access** Dieses Verfahren nutzt TDMA mit einer sich wiederholenden Rahmenstruktur. Der Master verteilt die Belegungsinformation an alle Teilnehmer. Die Teilnehmer bewerben sich auf einen freien Slot, indem sie in diesem eine Anfrage über ALOHA an den Master senden. Nur hier können Kollisionen entstehen. Die aktualisierte Belegungsinformation wird dann wieder an alle verteilt. Die Slots werden hier implizit über den Zugriff auf den entsprechenden Slot reserviert.

Gemeinsam an diesen beiden Verfahren ist die Unterteilung in eine Wettbewerbs- und Datenübertragungsphase. Alle Teilnehmer müssen zeitlich mit dem Master synchronisiert sein.

**MACA with Piggyback Reservations (MACA/PR)** Die Reservierung erfolgt hier nur für den *real-time* Datenverkehr. Es ist keine globale Zeitsynchronisation notwendig, obwohl der Zugriff in Zeitslots entsprechend der Reservierung unterteilt ist. Jeder Teilnehmer führt dazu eine Reservierungstabelle über die belegten Slots der Teilnehmer in Übertragungsbereichweite. Normaler (best-effort) Datenverkehr wird in der freien Slotzeit über MACAW abgewickelt. Real-time Verkehr wird mit MACAW eingeleitet. Zusätzlich zum Datenpaket wird die Reservierung des nächsten Zugriffszeitpunkts mitgesendet. Der nächste Zugriff erfolgt direkt ohne MACAW. Hier wird wieder mit dem Datenpaket die nächste Reservierung mitgesendet. Nachbarstationen aktualisieren ihre Tabellen aus den mitgehörten Übertragungen. Dieses Verfahren hat aber den Nachteil, dass die Slotbelegung fragmentieren kann, da ein freier Slot für die Reservierung mindestens die Sequenz RTS+CTS+DATA+ACK aufnehmen muß.

#### 3.3.2. Einsatz gerichteter Antennen (Beamforming und Beamsteering)

Gerichtete Antennen bündeln den Antennenstrahl. Die Abstrahlcharakteristik/Richtung ist entweder fest oder lässt sich elektronisch ändern bzw. ist umschaltbar. Beamforming wird genutzt, um die Abstrahlcharakteristik den aktuellen Kanalbedingungen anzupassen. Dabei ist auch eine Trennung mehrerer Datenströme/Übertragungen möglich. Beim Beamsteering wird der Abstrahlwinkel eines vorzugsweise schmal fokussierten Strahls (Pencil Beam) geändert. Eine Kommunikation ist dann nur bei entsprechender Ausrichtung beider Teilnehmer möglich. Die Position der Teilnehmer muß durch eine Nachbarschaftssuche beim Hinzufügen neuer Geräte erfolgen oder vorgegeben werden.

Omni-direktionale Antennen ermöglichen den Stationen die Durchführung von *Carrier Sensing* in alle Richtungen. Direktionale Antennen sind außerhalb der gebündelten Strahl-

charakteristik taub (deafness). Nachteilig ist der stark eingeschränkte Hörradius für Carrier-Sense-Verfahren. Vorteile ergeben sich durch die einfachere räumliche Trennung der Teilnehmer und somit der Steigerung der Kapazität des Kanals (spatial reuse) sowie durch eine größere Übertragungsreichweite aufgrund des höheren Antennengewinns (Link-Budget).

In der Literatur werden sowohl Übertragungsverfahren mit directionalen und omnidirektionalen Antennen als auch Verfahren nur mit directionalen Antennen beschrieben. Die Konfiguration mit einer omnidirektionalen Empfangsantenne soll die Taubheit verringern. Ein Problem ist aber die unterschiedliche Verstärkung beider Antennentypen.

Im folgenden werden einige Verfahren der Literatur zum Medienzugriff und zur Nachbarschaftssuche (device discovery) mit directionalen Antennen vorgestellt.

In [28] wird das Verfahren *Directional CSMA/CA* vorgestellt. Pro Antennensektor wird jeweils ein NAV verwaltet. Die Aktualisierung des NAV basiert auf den eingehenden Übertragungen von RTS-/CTS-Nachrichten in den nicht belegten Sektoren. Der Empfang belegter Antennensektoren wird abgeschaltet. Über die noch freien Antennensektoren kann dann kommuniziert werden. Als Ergebnis kann der Datendurchsatz bei einem System mit acht Antennensektoren verdreifacht werden.

In [29] werden die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einsatz richtungaler Antennen in Ad-hoc-Netzwerken veröffentlicht. Der Medienzugriff wird mittels CSMA/CA und RTS- und CTS-Paketen organisiert. Die Teilnehmer führen das Carrier-Sensing mit einem omnidirektionalen Antennenpattern aus und verwalten eine Tabelle mit NAV-Einträgen für jede Empfangsrichtung (direction of arrival). Probleme werden durch die asymmetrische Antennenverstärkung (omni vs. richtungal) verursacht. Es wird eine Methode vorgestellt, richtungale Verbindungen über eine RTS-Signalisierung über mehrere gemischte (omnidirektionale und richtungale) Multi-Hop-Verbindungen einzuleiten (Reservierung). Das CTS, die Daten und das ACK werden dann über die gewünschte richtungale Verbindung (Single-Hop) gesendet. Die Simulation wurde auch für das 2,4-GHz-Band durchgeführt aber nur für LOS-Szenarien.

In [30] wird ein CSMA/CA Verfahren mit Access Point Unterstützung vorgestellt. Es können bis zu drei Teilnehmergruppen gleichzeitig über Spatial Division Multiple Access bedient werden. Die Teilnehmer werden vorher einer der Multicast-Gruppen zugeordnet. Der Abstand zum AP beträgt ca. 1,5 m. Als PHY-Datenrate wird 3,8 GBit/s angenommen. Der Durchsatz beträgt dann bei einem Teilnehmer 3 GBit/s, bei zwei 6 GBit/s und ca. 9 GBit/s bei mehr als zwei Teilnehmern. Das beschriebene Verfahren wird auch im IEEE-802.11ac Standard [31] eingesetzt.

In [32] werden die Auswirkungen richtungaler Antennen (Beamforming) im WPAN untersucht. Es werden Wohnraum- und Büroszenarien evaluiert. Außerdem wird ein scheduling-basiertes MAC-Protokoll vorgestellt. Die Knoten sind einen Hop vom AP entfernt. Jeder Knoten wird periodisch abgefragt. Tritt nun eine Blockade auf, so sendet der AP eine Anfrage an den gestörten Knoten über einen benachbarten Knoten. Bei erfolgreicher Kontaktaufnahme wird der benachbarte Knoten als Relais für die künftige Kommunikation genutzt. Die Antennenrichtung kann paketweise umgeschaltet werden. Die Kontrolldatenrate beträgt bei sieben Knoten und einem aggregierten Datendurchsatz von ca. 1,2 GBit/s ungefähr 3 MBit/s.

In [33] wird die Interferenz richtungaler Übertragungen im 60-GHz-Band in Mesh-Netzen im Außenbereich untersucht. Es wird festgestellt, dass in Außenszenarien mit größeren Abständen eine pseudo-Kabelverbindung angenommen werden kann.

In [34] wird ein MAC-Protokoll für Multi-Hop-WPAN im Innenbereich vorgestellt. Als Grundlage wird der IEEE-802.15.3-MAC genutzt. Der Piconet Coordinator (PNC) bestimmt die Zugriffszeiten und die Route aller Teilnehmer unter Zuhilfenahme der Netz-

### 3. Medienzugriffsprotokolle für drahtlose Netzwerke im 60-GHz-Band

werktopologie, so dass auch räumliche Abhängigkeiten aufgrund der Antennenrichtcharakteristik ausgenutzt werden. Damit können mehrere Datenströme gleichzeitig über verschiedene Routen übertragen werden.

In [35] wird die direktionale Nachbarschaftssuche in Räumen mit LOS- und NLOS-Verbindungen analysiert. Die direkte Suche basiert auf einer erfolgreichen Kommunikation beider Teilnehmer. Indirekt kann ein Teilnehmer Informationen zum Standort eines neuen Teilnehmers über andere Teilnehmer erhalten (gossip based). Diese werden zusätzlich während der direkten Suche verteilt. Ist ein so bekannt gewordener Teilnehmer in Reichweite, wird dieser erst nach einer erfolgreichen Kommunikation als Nachbar aufgenommen, da dieser durch ein Hindernis nicht direkt erreichbar sein kann. Dieser zusätzliche Schritt ist in der direkten Suche nicht erforderlich und erhöht auch die Paketlänge. Je größer die Anzahl der Teilnehmer, desto besser ist das gossip-basierte Suchverfahren gegenüber der direkten Suche.

In [36] wird ein MAC mit Polling-Verfahren vorgestellt. Die Zeit ist in gleichlange Abschnitte eingeteilt. Der Medienzugriff erfolgt in drei Phasen. Die erste Phase sucht mittels Pilottönen nach neuen Teilnehmern. Dazu wird die Richtung zufällig gewählt. Die zweite fragt schon bekannte Teilnehmer nach Übertragungsanforderungen und dient somit der Reservierung der Zeitabschnitte für die dritte Datentransferphase. Die Datentransfers werden mit RTS-/CTS-Paketen eingeleitet, um die Kollisionswahrscheinlichkeit weiter zu senken, falls ein Reservierungskonflikt durch einen zu großen Öffnungswinkel oder durch Mobilität auftritt. Verlassen mobile Teilnehmer den Empfangsbereich, so müssen sie neu gesucht werden. Es erfolgt keine Verfolgung (Tracking) der Teilnehmer. Die Simulationen wurden für das 2,4-GHz-Band durchgeführt, lassen sich aber auf das 60-GHz-Band übertragen.

In [37] werden die drei Medienzugriffsverfahren CSMA/CA, TDMA und Polling im 60-GHz-Band verglichen. Es wird ein hybrider MAC vorgeschlagen, der alle drei Verfahren abhängig von der Anwendung einsetzt. Gleichzeitig erhöht sich dadurch natürlich auch der Implementierungsaufwand.

#### 3.4. Standardisierung im 60-GHz-Band

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht der Standardisierungen im 60-GHz-Band. Die *European Computer Manufacturers Association* (ECMA) veröffentlichte 2008 die erste Version und 2010 die zweite Version des ECMA-387 Standards [38] für WPAN. Das *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) veröffentlichte 2009 eine PHY- und MAC-Schichterweiterung zum IEEE 802.15.3 Standard als IEEE 802.15.3c [39]. Die *WirelessHD*-Vereinigung veröffentlichte 2008 und 2010 die WirelessHD-Spezifikation [40] für drahtlose Videonetze<sup>55</sup>. 2012 wurde durch das IEEE die PHY- und MAC-Schichterweiterung IEEE 802.11ad [41] für den IEEE 802.11 WLAN Standard [7] veröffentlicht.

Alle 60-GHz-Standards definieren die gleichen vier äquidistanten Kanäle mit einer Bandbreite von 2,16 GHz zwischen 57,24 und 65,88 GHz im 60-GHz-Band und unterstützen verschiedene Anwendungsszenarien mit kurzen Entfernungen (short range). Im Folgenden werden die Standards kurz vorgestellt. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Parameter wie Kanalbandbreite, Modulation und Datenraten ist in Tabelle 3.2 dargestellt.

---

<sup>55</sup>WVAN - wireless video area network

Tabelle 3.2: Übersicht der 60 GHz-Standards (fett) mit ihren „Vorgängern“

Standard	Band [GHz]	Bandbreite [MHz]	Modulation		FEC	Datenraten [MBit/s]	Medien- zugriff
802.11a	5	20	OFDM	64QAM	CC	54	CSMA
802.11g	2,4	13*20	OFDM	64QAM		54	CSMA
802.11n	2,4 & 5	19*20 40	OFDM	64QAM	BCC	4*150	STBC
					LDPC		CSMA
802.11ac	<6	20,40, 80,160	OFDM	256QAM	BCC LDPC	8*867	STBC CSMA
<b>802.11ad</b>	<b>60</b>	4*2160	SC	$\pi/2$ -16QAM	LDPC	4620	TDMA
			OFDM	64QAM		6756	CSMA
802.15.3	2,4	1,15,22		DQPSK		22	TDMA
			TCM	64-QAM		55	CSMA
<b>802.15.3c</b>	<b>60</b>	4*2160	SC	$\pi/2$ -16QAM	LDPC	4620	TDMA
			OFDM	64QAM		5775	CSMA
ECMA-368	3,1-10,6	14*528	OFDM	QPSK	CC	200	TDMA
				DCM		480	CSMA
<b>ECMA-387</b>	<b>60</b>	4*2160	SCBT	16QAM	RS	6350	TDMA
			OFDM	16QAM	RS&CC	4032	CSMA
<b>WirelessHD</b>	<b>60</b>	4*2160	OFDM	64QAM	RS&CC	4*7138	TDMA CSMA

### 3.4.1. IEEE 802.11 - dritte Erweiterung „ad“

Die Erweiterung fügt das 60-GHz-Band dem Standard hinzu. Zusammen mit der vierten Erweiterung IEEE 802.11ac [31] für hohen Durchsatz in Frequenzbändern unter 6 GHz umfaßt der 802.11 Standard ca. 3500 Seiten. Die 60-GHz-Erweiterung wird mit *Directional Multi-Gigabit* (DMG) bezeichnet. Die Erweiterung definiert vier PHY-Typen: Control-PHY, OFDM-PHY, SC-PHY und den Low-Power SC-PHY.

#### 3.4.1.1. MAC

Der Medienzugriff ist in Rahmen (Superframes), hier Beacon Interval (BI), organisiert (siehe Abbildung 3.4). Das BI besteht aus Zugriffsperioden mit unterschiedlichen Zugriffsregeln. Im BTI (Beacon Transmission Interval) werden ein oder mehrere Beacon-Frames übertragen. Im A-BFT (Association Beamforming Training) wird das Beamforming-Training abgewickelt. Im ATI (Announcement Transmission Interval) werden Steuerpakete zwischen AP und Nicht-AP ausgetauscht. Das DTI (Data Transfer Interval) beinhaltet die Datenübertragungen zwischen den Stationen. Diese können in wettbewerbsbasierte CBAP (Contention-Based Access Period) und wettbewerbsfreie SP (Service Period) eingeteilt werden. In der CBAP wird der Zugriff über den EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) abgewickelt. Die Datenpakete werden basierend auf unterschiedliche Nutzerprioritäten beim Zugriff priorisiert. In den SP werden geplante also kollisionsfreie Datentransfers durchgeführt. Mit Hilfe der dynamischen Belegung kann eine Station Zugriffszeit außerhalb der CBAP und der SP auf dem Kanal anfordern. Die CPAB eignet sich für stoßweisen Datenverkehr. Die SP ist besonders geeignet für Datenverkehr mit hohen Anforderungen an die Latenz z.B. Videoübertragungen.

### 3. Medienzugriffsprotokolle für drahtlose Netzwerke im 60-GHz-Band

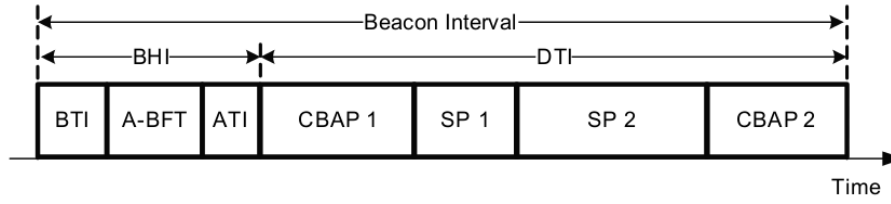


Abbildung 3.4: IEEE 802.11ad: Beispiel für Zugriffsperioden im Beaconintervall [41]

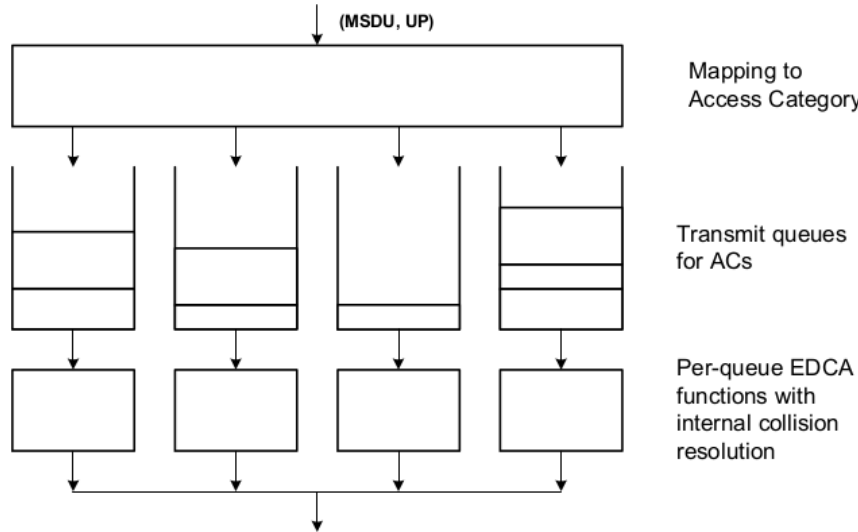


Abbildung 3.5: IEEE 802.11: Modell der EDCA-Referenzimplementierung [7]

**Enhanced distributed channel access (EDCA)** Abbildung 3.5 zeigt ein Modell der Referenzimplementierung. Die eingehenden MSDUs werden anhand der Nutzerpriorität (UP<sup>56</sup>) klassifiziert und in die Sendewarteschlange für die entsprechende Zugriffskategorie (AC<sup>57</sup>) gestellt. Jeder AC wird ein Parameterset für die DCF aus Tabelle 3.3 zugeordnet. Zusätzlich wird die Zugriffszeit (TXOP<sup>58</sup>) limitiert. Das entsprechende Arbitrary IFS (AIFS) wird nach (10) errechnet.

$$AIFS[AC] = AIFSN[AC] \times aSlotTime + aSIFSTime \quad (10)$$

Soll ein Paket gesendet werden, bewerben sich alle AC mit einem intern ausgeführten DCF-Zugriff mit Backoff. Der Gewinner erhält dann Zugriff auf den Kanal. Abbildung 3.6 zeigt die Zeitverhältnisse der IFS. Über den EDCA lässt sich der Datenverkehr priorisieren, aber es können keine strikten Dienstgüteanforderungen garantiert werden [42, 43].

**Fragmentierung und Aggregierung** Die maximale Länge der MSDU beträgt 7920 Bytes und die der A-MSDU<sup>59</sup> 7935 Bytes. Eine A-MSDU besteht aus mehreren MSDUs. Erreicht ein längeres Paket den MAC bzw. sind die Übertragungsbedingungen nicht optimal, so muß dieses zerlegt werden. Zerlegte Pakete werden vor dem Senden nicht wieder zusammengefaßt. Bestätigungen der MSDUs werden gesammelt und als Block-ACK gesendet.

<sup>56</sup>UP - User Priorities

<sup>57</sup>AC - Access Category

<sup>58</sup>TXOP - Transmit Opportunity

<sup>59</sup>A-MSDU - Aggregated MSDU

Tabelle 3.3: IEEE 802.11: Default EDCA Parameter für alle ACs [7]

AC	CWmin	CWmax	AIFSN	Max TXOP
Background (AC_BK)	15	1023	7	0
Best Effort (AC_BE)	15	1023	3	0
Video (AC_VI)	7	15	2	3,008 ms
Voice (AC_VO)	3	7	2	1,504 ms
Legacy DCF	15	1023	2	0

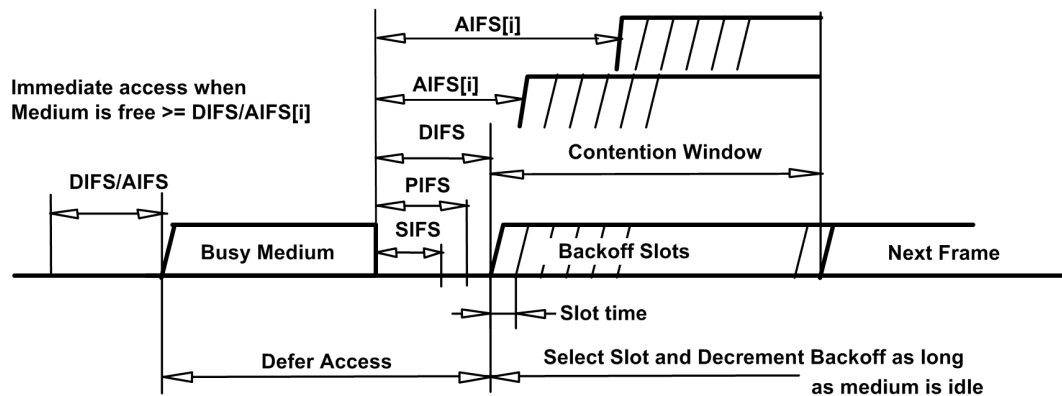


Abbildung 3.6: IEEE 802.11: IFS Verhältnisse [7]

Durch das Zusammenfassen mehrerer MSDUs und durch die Übertragung gesammelter Bestätigungen wird der Overhead in der MAC- und der PHY-Schicht reduziert und somit der Datendurchsatz erhöht. Kapitel 4 widmet sich Verfahren zur Steigerung der Effizienz von MAC-Protokollen.

**Fast Session Transfer (FST)** FST ermöglicht den Wechsel eines Datentransfers von einem Kanal auf einen anderen im selben oder in einem anderen Frequenzband (2,4, 5, 60 GHz), falls genug Bandbreite/Datenrate zur Verfügung steht.

**Relay operation** Bei einer gestörten Verbindung kann eine Datenübertragung über eine andere Station geleitet werden. Weiterhin ist es möglich, dass eine zusätzliche Station genutzt wird, um dieselben Daten simultan an die Zielstation zu senden. Dazu wird vorher eine Zeitsynchronisation durchgeführt (TPA - Transmission Time-Point Adjustment).

### 3.4.1.2. PHY

Eine Übersicht der PHY-Parameter befindet sich in Tabelle 3.4. Der Control- und der SC-PHY müssen immer implementiert werden. Außer dem Low-Power SC-PHY benutzen alle LDPC als FEC. Der Low-Power SC-PHY benutzt RS+CC, um die Leistungsaufnahme zu senken.

Eingehende MPDUs können auch auf PHY-Ebene zusammengefasst werden. Dazu wird jede MPDU durch einen vier Byte langen Trenner (MPDU Delimiter) gekennzeichnet, so dass im Empfänger der Anfang der (nächsten) MPDU gefunden werden kann, auch wenn ein Frameabschnitt fehlerhaft ist.

In [44] wurde die Performanz des PHY und MAC evaluiert. Bis 10 m ist 1 GBit/s im LOS-Szenario mit einer Antenne (SISO) möglich. Beim Einsatz einer  $2 \times 2$  MIMO-

### 3. Medienzugriffsprotokolle für drahtlose Netzwerke im 60-GHz-Band

Tabelle 3.4: IEEE 802.11ad: PHY-Übersicht

PHY	Control	OFDM	SC	Low-Power SC
Modulation (max)	SC	OFDM	SC	SC
	DBPSK	64QAM	$\pi/2$ -16QAM	$\pi/2$ -QPSK
Datenrate [MBit/s]	27,5	6756	4620	2503
FEC	LDPC(672)	LDPC(672)	LDPC(672)	RS+BCC
Abtastrate [MS/s]	-	2640	-	-
Chiprate [Mchips/s]	1760	-	1760	1760
Unterträger	-	512	-	-

Konfiguration mit STBC<sup>60</sup> steigert sich die Entfernung auf 22 m. Über 3 GBit/s werden bis 2,5 m bzw. bis 5 m erreicht.

Die Nutzung der geplanten *Service Period* erlaubt eine MAC-Effizienz von 90% bei Paketlängen größer als 8 KiB<sup>61</sup> und 1 GBit/s PHY-Datenrate, größer als 16 KiB mit 2 GBit/s und größer als 64 KiB mit 4 GBit/s [45].

#### 3.4.2. IEEE 802.15.3 - zweite Erweiterung „c“

Das WPAN besteht aus Geräten, von denen eines die Funktion des Koordinators (PNC<sup>62</sup>) übernimmt. Der PNC verteilt Beacons und bestimmt so das Timing im Ad-Hoc-Netzwerk. Weiterhin werden QoS, Leistungsaufnahme und der Zugriff koordiniert.

##### 3.4.2.1. MAC

Das Piconetz ist in Rahmen (Superframes) organisiert. Das Superframe besteht aus drei Teilen: dem Beacon, der wettbewerbsbasierten Zugriffszeit (CAP - Contention Access Period) und der geplanten Zugriffszeit (CTAP - Channel Time Allocation Period) die aus Kanalbelegungen (CTA - Channel Time Allocation) besteht. Innerhalb der CAPs werden Kommandos und asynchrone Daten mit CSMA/CA übertragen. Die CTAs werden für Kommandos, isochrone Datenströme und asynchrone Datenverbindungen genutzt. Hat ein Gerät nur kleine Datenmengen zu übertragen, können dafür die CAPs genutzt werden. Bei größeren Datenmengen muß eine isochrone Kanalbelegung reserviert werden. Diese kann später je nach Bedarf geändert werden. Die Position der CTAs kann sich mit jedem Superframe ändern. Im Gegensatz zur Bandbreitenreservierung besteht eine asynchrone Belegung aus einer Zugriffszeitanforderung.

Im *Quasi-omni*-Mode werden die Beacons nacheinander in alle Richtungen (Sektoren) gesendet. Die CAPs werden zusätzlich für eine bestimmte Richtung spezifiziert (siehe Abbildung 3.7).

Es werden zwei Aggregierungsmethoden unterstützt. Eine Standardmethode für hochrätige Daten bzw. Audio-/Video-Streaming und eine *Low-Latency*-Methode für eine bidirektionale Kommunikation mit kurzen Latenzen. Ein PHY-Frame kann bis zu acht MAC-Pakete (MPDUs) zusammenfassen. Diese werden mit einem Block-ACK bestätigt. Im Low-Latency-Modus wird die Wartezeit bis zur vollständigen Belegung des PHY-Frames begrenzt. Es werden dann nur die innerhalb der Wartezeit eingetroffenen MPDUs gesendet. Ein leeres PHY-Frame wird gesendet, falls keine MPDUs eintrafen. Die Nutzung der

<sup>60</sup>STBC - Space Time Block Coding

<sup>61</sup>1 Kibibyte (KiB) =  $2^{10}$  Bytes = 1024 Bytes nach DIN EN 80000-13:2009-01

<sup>62</sup>PNC - Pico Net Coordinator



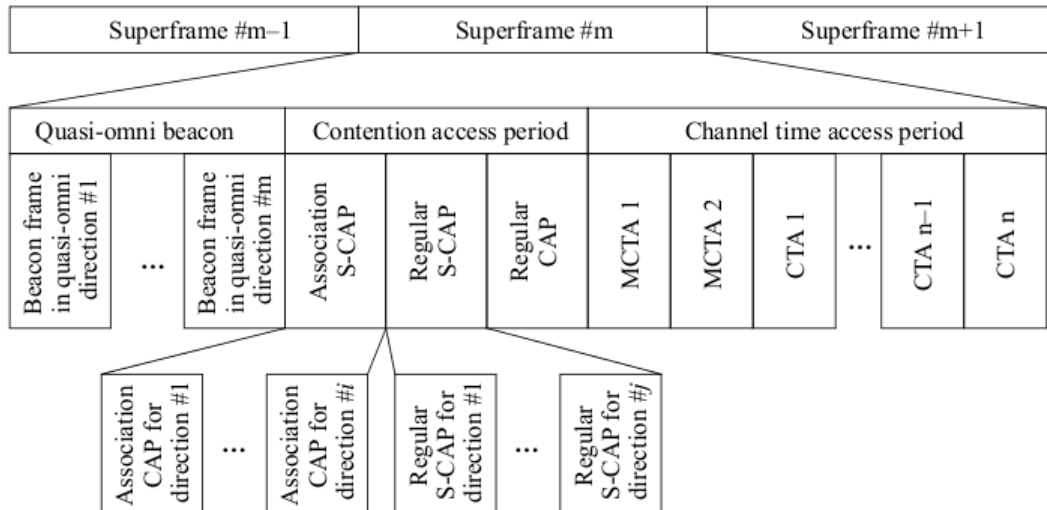


Abbildung 3.7: IEEE 802.15.3c Piconet Superframe-Struktur im Quasi-Omni-Modus [39]

Aggregation wird im PHY-Header signalisiert.

### 3.4.2.2. PHY

Der Standard definiert drei PHY-Typen: Single-Carrier (SC), High Speed Interface (HSI) und Audio/Video (AV). Über einen gemeinsamen Common-Mode-PHY kann miteinander kommuniziert werden. Der AV-PHY unterstützt zwei PHY-Modi: den High-Rate PHY (HRP) und Low-Rate PHY (LRP). In jedem HRP-Kanal lassen sich drei LRP-Kanäle unterbringen. Tabelle 3.5 gibt eine Übersicht der PHY-Parameter.

Die FEC unterstützt ungleiche Fehlersicherung (UEP<sup>63</sup>). UEP ist nur mit unkomprimierten Video- bzw. Audiodatenströmen zulässig, bei der die höherwertigen Bits mit einer höheren Coderate geschützt werden als die niederwertigen. Dazu werden die Daten in zwei Datenströme jeweils mit den niederwertigen und höherwertigen Bits aufgeteilt und mit einer Prüfsumme (CRC) versehen. Ist nach dem Empfang der niederwertige Datenstrom fehlerhaft, so wird dieser verworfen und nicht neu übertragen. Es werden dann nur die Information der höherwertigen Bits genutzt, sofern sie korrekt übertragen wurden. Andernfalls wird neu übertragen.

In [46] wird gezeigt, dass mit diesem Verfahren eine gute Videoqualität bei unkomprimierten Videoinformationen erreicht wird. Eine einmalige Übertragungswiederholung ist ausreichend. In [47] wurde die Performanz des MACs und des PHYs mit dem CM1.3 Kanalmodell evaluiert. Die maximale Datenrate von 3,8 GBit/s wird bei einer Distanz unter 2 m erreicht. Mindestens 1 GBit/s wird bis zu einer Entfernung von ca. 5,5 m erreicht.

### 3.4.3. ECMA-387

Der ECMA-387 Standard definiert zwei Gerätetypen mit unterschiedlichen Fähigkeiten. Typ A (high-end) unterstützt SCBT<sup>64</sup> und OFDM mit Datenraten bis zu 6,3 GBit/s und Typ B (Mobil, Low-Power) unterstützt SC-Modulation mit Datenraten bis zu 3,175 GBit/s. Für jede Geräteklasse wird ein PHY-Modus (Common PHY Mode) definiert, mit dem Beacons gesendet werden. Typ B nutzt ein Dual-Beacon-Verfahren, indem jeweils ein Beacon

<sup>63</sup>UEP - Unequal Error Protection

<sup>64</sup>SCBT - Single Carrier Block Transmission

Tabelle 3.5: IEEE 802.15.3c: PHY-Übersicht

PHY-Typ	CMS	SC	HSI	A/V	
				HRP	LRP
Modulation (max)	SC	SC	OFDM	OFDM	OFDM
	$\pi/2$ -BPSK	$\pi/2$ -16QAM	64QAM	16QAM	BPSK
Datenrate [MBit/s]	25,8	4620/5280	5775	3807	10,2
FEC	RS(255,239)	RS(255,239)	LDPC(672)	RS & CC	CC
		LDPC(672)			
Abtastrate [MS/s]	-	-	2640	2538	317,25
Chiprate [Mchips/s]	1760	1760	-	-	-
Bandbreite [MHz]	-	-	1815	1760	92
Unterträger	-	-	512	512	128

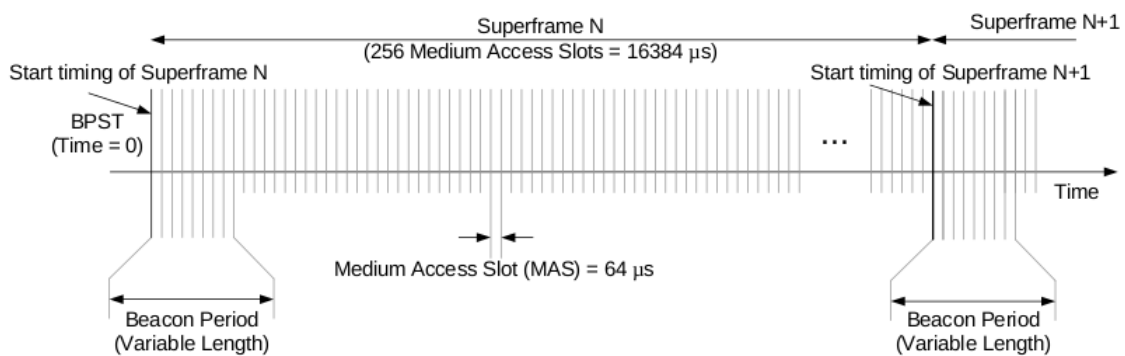


Abbildung 3.8: ECMA-387: Superframe [38]

vom Typ A und Typ B gesendet werden. Typ A sendet nur ein Beacon im eigenen PHY-Modus. Einige PHY-Modi ermöglichen eine Bündelung (Channel Bonding) der Kanäle. Die Datenrate steigert sich entsprechend auf 25,4 GBit/s bei vier Kanälen. Eine zusätzliche HDMI-Protokollabstraktionsschicht<sup>65</sup> unterstützt HD Audio- und Videoübertragungen.

### 3.4.3.1. MAC

Der ECMA-387 MAC arbeitet ohne zentrale Koordination. Die Zeit wird in 256 Medienzugriffsslots (MAS) pro Rahmen (Superframe) unterteilt. Abbildung 3.8 zeigt die Übersicht eines Superframes. Am Anfang befinden sich die Slots der Beacon-Periode. In dieser werden die Beacons mit CSMA/CA verteilt und damit das gesamte System koordiniert. Danach kommen die frei verfügbaren Slots.

Über ein verteiltes Reservierungsprotokoll (DRP - Distributed Reservation Protocol) werden die Slots von den Stationen belegt. Die Reservierung erfolgt z.B. über wettbewerbsbasierten Zugriff (DCA - Distributed Contention Access) oder exklusiven Zugriff für die Reservierungseigentümer (Hard Reservation). Die Reservierung erfolgt explizit über Reservierungsanfragen (DRP Reservation Request & DRP Reservation Response) oder implizit über die Verteilung der Reservierung über die Beacons.

Pakete können zusammengefaßt und mittels Block-ACK bestätigt werden.

Die Nachbarschaftssuche (device discovery) erfolgt über einen vorgeschriebenen Kanal (Discovery Channel). Die Geräte werden sektorweise abgefragt. Nach der erfolgreichen

<sup>65</sup>PAL - Protocol Abstraction Layer

Tabelle 3.6: ECMA-387: PHY-Übersicht

Gerätekategorie	Typ A		Typ B
Modulation (max)	SCBT	OFDM	SC
	16QAM	16QAM	DQPSK
Datenrate [MBit/s]	6350	4032	3175
FEC	RS(255,239)	RS & CC	RS
Abtastrate [MS/s]	1728	2592	1728
Unterträger	-	512	-

Suche wird das Antennentraining und -tracking durchgeführt.

Mit einem optionalen Out-of-band (OOB) Signalisierungskanal kann das WPAN-Management omni-direktional durchgeführt werden. Dieser unabhängige Kanal kann dann für eine Kommunikation während einer gestörten Verbindung oder für Bestätigungen genutzt werden.

### 3.4.3.2. PHY

Die PHY-Parameter sind in Tabelle 3.6 aufgeführt. Die FEC unterstützt im MRP und LRP eine ungleiche Fehlersicherung (UEP).

### 3.4.4. WirelessHD

Die WirelessHD-Spezifikation für drahtlose Videonetze (WVAN) definiert drei PHY-Typen mit kleiner, mittlerer und hoher Datenrate. Diese werden entsprechend dem Szenario für *low-power*-Anwendungen, mobile Anwendungen und hochqualitatives HD-Video eingesetzt.

Das WVAN besteht aus einem Koordinator und zusätzlichen Stationen. Der *Medium-rate PHY* (MRP) und der *High-rate PHY* (HRP) unterstützen Multi-Gigabit Datendurchsatz bis 10 m Distanz. Die Übertragung erfolgt direktional und wird nur für Unicast-Verbindungen genutzt. Die Ausstattung erlaubt z.B. nur die Integration eines HRP-/MRP-Senders bzw. Empfängers, d.h. ein Fernseher hat nur den HRP-Empfänger und die Set-Top-Box hat nur den HRP-Sender integriert. Den *Low-Rate PHY* (LRP) benötigen alle Stationen.

Beamforming wird in Beamsuche und Beamtracking eingeteilt. Die Beamsuche kann explizit ausgeführt werden bzw. implizit durch Vorgabe einer Vorschrift für alle Beams (Beam Book). Das Beamtracking wird während der Datenübertragung durchgeführt. Der HRP unterstützt optional Spatial Multiplex mit bis zu vier Datenströmen.

#### 3.4.4.1. MAC

Auch hier werden Superframes für die Organisation genutzt. Diese beginnen jeweils mit einem Beacon, das durch den Koordinator gesendet wird. Ein Superframe kann wettbewerbsbasierte Perioden (RATB<sup>66</sup>) und wettbewerbsfreie Perioden (CTB<sup>67</sup>) enthalten. Die CTBs sind einer Quell- und Zieladresse zugeordnet. Die Anordnung der RATBs und CTBs erfolgt über ein Reservierungsverfahren und wird durch den Koordinator in den Beacons bekannt gegeben. Der Koordinator kann während des Betriebs gewechselt werden. Das ist

<sup>66</sup>RATB - Random Access Time Block

<sup>67</sup>CTB - Channel Time Block

Tabelle 3.7: WirelessHD: OFDM-PHY-Übersicht

PHY	HRP	MRP	LRP
Modulation	OFDM	OFDM	OFDM
	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM	BPSK
Datenrate [MBit/s]	4*7138	1904	40
FEC	RS(224,216)	RS(224,216)	CC
	CC (EEP/UEP)	CC (EEP/UEP)	
Abtastrate [MS/s]	2538	1269	317,25
Bandbreite [MHz]	1760	890	92
Unterträger	512	256	128

notwendig, falls z.B. eine Station ausgeschaltet wird bzw. wenn eine Station mit einer höheren Priorität das Netz betritt. Ein zweites Netz auf einer anderen Frequenz (Drone WVAN) kann erstellt werden, wenn das ursprüngliche Netz (Home WVAN) ausgebucht/belegt ist.

Im RATB wird PSMA/CA<sup>68</sup> als Medienzugriffsverfahren mit dem LRP genutzt. Die CTBs unterstützen bidirektionale Übertragungen, wenn zur ACK-Anforderung auch eine Poll-Anforderung durch den „Master“ gesetzt wird. Die andere Station antwortet mit einer *channel time increase/decrease/no-change*-Nachricht. Das veranlaßt den Master die Zugriffszeit anzupassen. Weiterhin kann dem aktuellen CTB nicht reservierte nachfolgende Zeit zugeordnet werden ohne den Koordinator zu fragen. CTBs können dynamisch mit Hilfe des Koordinators verlängert und verkürzt werden. Die Stationen können Bandbreite beim Koordinator reservieren. Die Zugriffszeit wird statisch oder dynamisch für jedes Superframe festgelegt.

Folgende Aufgaben des LLC werden vom MAC ausgeführt: Fragmentierung und Aggregation, Flow Control, Sicherstellung der Paketreihenfolge, Protokollmultiplex und zuverlässige Übertragung. Die Sendeleistungssteuerung (TPC<sup>69</sup>) ermöglicht die Reduzierung der Leistungsaufnahme.

#### 3.4.4.2. PHY

Alle PHY-Typen benutzen OFDM als Modulationsverfahren. Tabelle 3.7 zeigt eine Übersicht der PHY-Parameter. Die FEC unterstützt im MRP und LRP eine ungleiche Fehler-sicherung (UEP).

### 3.5. Datensicherheit (Security)

Im Gegensatz zur Datensicherungsschicht, die eine zuverlässige Übertragung ermöglicht, beschäftigt sich die Datensicherheit mit den Daten selbst. Bevor eine Verbindung zwischen zwei Teilnehmer aufgebaut wird, soll sichergestellt sein, dass jeder der Teilnehmer auch der ist, den er vorgibt zu sein (Authentizität). Weiterhin soll garantiert werden, dass die Daten nicht manipuliert wurden bzw. eine Manipulation festgestellt werden kann (Integrität). Dazu reicht eine einfache CRC nicht aus, da diese zusammen mit den Daten auch geändert werden kann.

Ein verteiltes Protokoll ist abhängig vom zuverlässigen Austausch von Kontroll- bzw. Managementnachrichten. Werden alte Übertragungen (Replay-Attacken) bzw. neue Übertragungen eingeschleust, so hat das ernste Konsequenzen auf den Protokollfluss und die

<sup>68</sup>PSMA/CA - Preamble Sense Medium Access with Collision Avoidance

<sup>69</sup>TPC - transmit power control

Stabilität des Kommunikationsprotokolls sowie die Stabilität der Protokolle höherliegender Schichten und Anwendungen. Um die Reihenfolge zu gewährleisten, muß jedes Paket fälschungssicher nummeriert werden, so dass Dopplungen sowie zusätzliche Pakete erkennbar sind. Die Integrität und die Nummerierung kann z.B. durch Secure-Hash-Verfahren zusammen mit zertifikatsbasierten asymmetrischen Verschlüsselungsverfahren sichergestellt werden.

Das Medium Luft erlaubt auch anderen das Mitlesen der Übertragungen, wenn das Kommunikationsverfahren bekannt ist. Um das zu verhindern, werden die Daten verschlüsselt. Asymmetrische Verschlüsselungsverfahren sichern Authentizität, den Schlüsseltausch und die Datenintegrität. Die mit asymmetrischen Verfahren generierten und ausgetauschten Schlüssel werden dann von den symmetrischen Verschlüsselungsverfahren für die Datenverschlüsselung verwendet.

Die Integration der Datensicherheit in ein MAC-Protokoll ist nicht Thema dieser Arbeit. Deshalb wird auf die einschlägige Literatur [48] und die Verfahren aktueller Standards z.B. WPA, WPA2, TKIP in IEEE 802.11 [7] verwiesen. Ein MAC-Protokoll muß Funktionen und Datenstrukturen bereitstellen, um Datensicherheit bei der Übertragung bereitzustellen. Die einzusetzenden Verfahren sind sehr rechenintensiv und integraler Bestandteil der Hardwareimplementierung. Die Strukturen des im folgenden vorgestellten MAC-Protokolls lassen sich dazu jedoch nachträglich erweitern.

### 3.6. Allgemeines MAC-Modell mit Anwendungsschnittstelle

In dieser Arbeit wird ein direktionales Halbduplex-MAC-Protokoll vorgestellt, dessen Strukturen sich für eine Hardwareintegration eignen und das einen hohen Datendurchsatz mit geringen Latenzen ermöglicht. Das MAC-Protokoll soll vor allem Richtfunkstrecken im Single- und Multi-Hop-Betrieb über kurze und längere Distanzen mit einer moderaten Anzahl an Teilnehmern unterstützen. Das Kommunikationssystem wird über Gigabit-Ethernet-Ports mit der Datenquelle bzw. -senke verbunden.

Ausfälle einer Verbindung sollen durch Umleitung der Pakete über andere Stationen kompensiert werden. Kurze Unterbrechungen werden direkt durch das MAC-Protokoll behandelt. Dazu muß der Ausfall schnell detektiert und eine alternative Verbindung gewählt werden. Neu installierte Stationen werden mit Hilfe eines direktionalen Suchalgorithmus gefunden. Dieser ermittelt auch die beste Ausrichtung des Antennenstrahls beider/aller Stationen. Die Suche kann initial oder während des laufenden Betriebs erfolgen.

Eine zuverlässige Übertragung wird von Knoten zu Knoten sichergestellt. Die Ende-zu-Ende-Sicherung wird durch die höheren Schichten durchgeführt.

Ein Paketplaner stellt QoS-Funktionalitäten basierend auf den VLAN-CoS-Tag zur Verfügung. Ein Traffic-Shaper glättet burstweisen Datenverkehr auf die erlaubte maximale Bandbreite.

Die Verwaltung der Netzwerkarchitektur ist über Standardschnittstellen (z.B. SNMP - Simple Network Management Protocol in RFC 1157/RFC 3410) erreichbar.

Die notwendige direktionale Übertragung und die Anforderungen an die Robustheit der Übertragung erfordern ein Protokoll mit einer zentralen Steuerung (Master). Die Einsatzszenarien gehen von nicht-mobilen Stationen aus.

Die Integration in eine FPGA-Hardware lässt funktionale Erweiterungen mit direktem Zugriff auf die PHY-Schnittstelle zu. Das ermöglicht der Anwendung direkten Zugriff auf den Kanal. Das MAC-Protokoll regelt hier den Zugriff auf das Medium. Parameter und Ergebnisse lassen sich über eine definierte Schnittstelle austauschen.

### 3. Medienzugriffsprotokolle für drahtlose Netzwerke im 60-GHz-Band

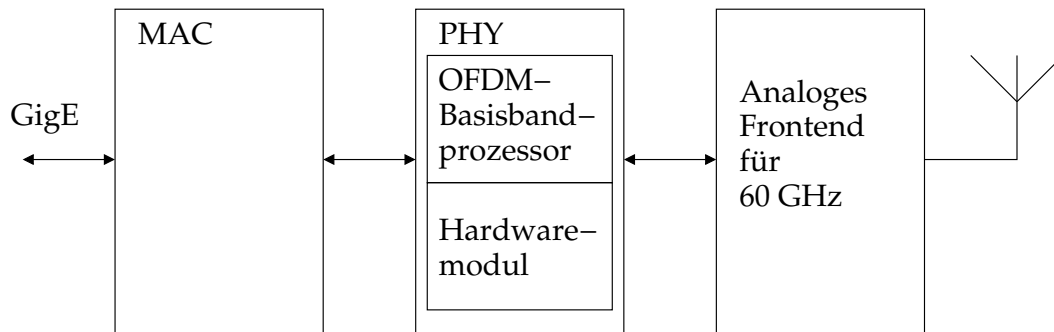


Abbildung 3.9: Systemarchitektur

Abbildung 3.9 zeigt ein Modell der Systemarchitektur des Kommunikationssystems mit der Integration des zusätzlichen Hardwaremoduls in der PHY-Schicht für den direkten Zugriff auf den Übertragungskanal.

Im Folgenden werden die notwendigen Funktionen nach den jeweiligen OSI-Schichten geordnet.

#### Funktionen der Vermittlungsschicht

- Nachbarschaftssuche und Zugriffsplanung
- Realisierung des Routingprotokolls für Multi-Hop-Szenarien
- Traffic-Shaping

#### Funktionen der LLC- und MAC-Schicht

- direktonaler Medienzugriff mittels Polling und TDMA
- Datensicherung von Knoten zu Knoten mit selektiver Übertragungswiederholung (ARQ)
- automatische Einstellung der Sendeleistung (TPC)
- Einstellung der Modulation und der FEC abhängig von den Übertragungsbedingungen (ACM)
- Fragmentierung von Datenpaketen
- Aggregation von Fragmenten und Datenpaketen
- Paketweiterleitung/Forwarding (Single-Hop) und Steuerung des Beamsteering
- Paketplaner für QoS

#### Funktionen der Bitübertragungsschicht (PHY)

- Nutzung des digitalen OFDM-Basisbandprozessors aus [49, 50]
- RSSI vom AFE bzw. Signalleistung der Präambel aus dem digitalen BB (nicht notwendig für den Medienzugriff, aber für TPC)
- Anwendungsschnittstelle für den direkten Zugriff auf das Übertragungsmedium (z.B. Ranging, Antennentracking mit Trainingssymbolen)

### 3.7. Zusammenfassung

Der Überblick über die Funktionen der Vermittlungs- und der Datensicherungsschicht wurde mit der Darstellung der Grundlagen zu Medienzugriffsprotokollen vervollständigt. Dabei ist ersichtlich, dass für die Realisierung eines drahtlosen Kommunikationssystems Funktionalität aus höherliegenden Schichten mit in den MAC integriert werden muß, um komplexere Szenarien abzudecken. Unterschiedliche Anforderungen der Anwendungen an Dienstgütekriterien wie garantierte Bandbreiten (Datendurchsatz) oder geringe Latenzen sind nur mit zusätzlichem Aufwand (Paketplaner, Traffic-Shaper, Hardwarearchitektur) erreichbar. Die Zuverlässigkeit der Datenübertragung hängt von den Möglichkeiten (Rückkanal, FEC) und vom betriebenen Aufwand (ARQ, Fragmentierung, Aggregation, Block-ACK) ab.

Der Einsatz gerichteter Antennen bringt Vor- und Nachteile mit sich. Ein Vorteil ist die größere Kommunikationsreichweite. Der Nachteil der Taubheit lässt sich durch Mehraufwand beim Medienzugriff kompensieren. Die Forschung zu Richtionalen MAC-Protokollen und der Fortschritt der Standardisierung im 60-GHz-Band zeigen die Aktualität des Themas. Der Einsatz im Mobilfunkbereich als Backhaul-Lösung und als Zugangstechnologie (5G) erfordert leistungsfähige, aber auch preiswerte Komponenten.

Die besonderen Anforderungen an das hier bevorzugte Szenario (Backhaul) mit der Flexibilität für andere Szenarien lassen keine *Standard*implementierung zu. Diese sind entweder überdimensioniert bzw. (noch) nicht als Komplettlösung verfügbar. Durch den direkten Zugriff auf die Hardware ist es möglich, noch nicht vorhandene Funktionalität mit zu integrieren. Funktionen aus benachbarten (OSI-)Schichten (Vermittlungsschicht, Bitübertragungsschicht) sind notwendig, um das MAC-Protokoll zu unterstützen.

Ein hoher Datendurchsatz erfordert besondere Maßnahmen zur Reduzierung des Protokolloverheads. Diese werden im folgenden Kapitel vorgestellt.





## 4. Verfahren zur Steigerung der Effizienz

Die Effizienz  $E$  eines Protokolls beschreibt das Verhältnis der Übertragungsdauer der Daten  $T_{PL}$  zur Übertragungsdauer des PHY-Frames  $T_{PF}$  (11) und berücksichtigt die MAC- und die PHY-Schicht. Der MAC-Datendurchsatz  $S$  ist definiert durch die Menge der Nutzdaten  $N_{PL}$  bezogen auf die Übertragungsdauer des PHY-Frames  $T_{PF}$  (12).

$$E = T_{PL}/T_{PF} \quad (11)$$

$$S = N_{PL}/T_{PF} \quad (12)$$

Die Effizienz wird durch den Verarbeitungsaufwand (Overhead) der Bitübertragungs- und Datensicherungsschicht bestimmt. Die PHY-Schicht trägt mit ihren Verarbeitungslatenzen und Signalisierungs-overhead zum Gesamt-overhead bei. Die MAC-Schicht trägt mit zusätzlichen Daten zum Overhead bei. Während der Verarbeitung der eingehenden Datenpakete werden diese mit zusätzlichen Kontrollinformationen der jeweiligen Schicht erweitert. In der MAC-Schicht sind das z.B. der MAC-Header (MH), Aggregationsheader (AH) und die Prüfsummen (FCS) über die Header und der MSDU. In der PHY-Schicht wird die MPDU mit dem PHY-Header (PH) und der Präambel erweitert. Im Endeffekt resultieren die zusätzlichen Daten in der MAC-Schicht in einer Verlängerung des PHY-Frames und damit der Übertragungsdauer im Sender und der Dekodierungsdauer im Empfänger. Die Übertragungsdauer sowie die Dekodierungsdauer der PHY-Nutzdaten sind abhängig von der PHY-Datenrate (Modulations- und Kodierungsverfahren). Weiterhin summieren sich protokollbasierte Übertragungszeiten, in denen keine Nutzdaten übertragen werden. Darunter fallen z.B. die Bestätigungen für die Fehlersicherung, Beacons für die Konfiguration und Zeitsynchronisierung und protokollbedingte Wartezeiten (Timeouts/Schutzzeiten).

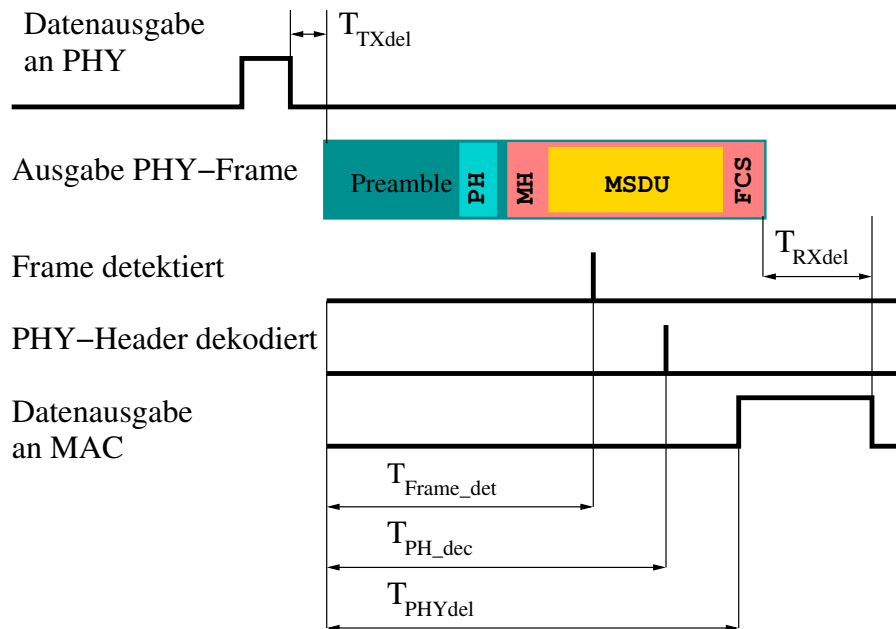


Abbildung 4.1: Resultierende Latenzen aus dem PHY- und MAC-Overhead

Abbildung 4.1 zeigt den Aufbau eines PHY-Frames bestehend aus der Präambel, dem PHY-Header (PH) und der MPDU. Die MPDU besteht aus dem MAC-Header (MH), den Daten (MSDU) und der Prüfsumme (FCS) über den MAC-Header und den Daten. Nach der Ausgabe der MPDU an den PHY beginnt nach einer kurzen Zeit ( $T_{TXdel}$ ) die Ausgabe

#### 4. Verfahren zur Steigerung der Effizienz

des PHY-Frames. Im Empfänger werden nach der Detektierung der Präambel der PHY-Header und die darauf folgenden Daten dekodiert. Die internen Latenzen des digitalen Basisbandprozessors verursachen eine verzögerte Datenausgabe auch nach dem Ende der Übertragung des PHY-Frames.

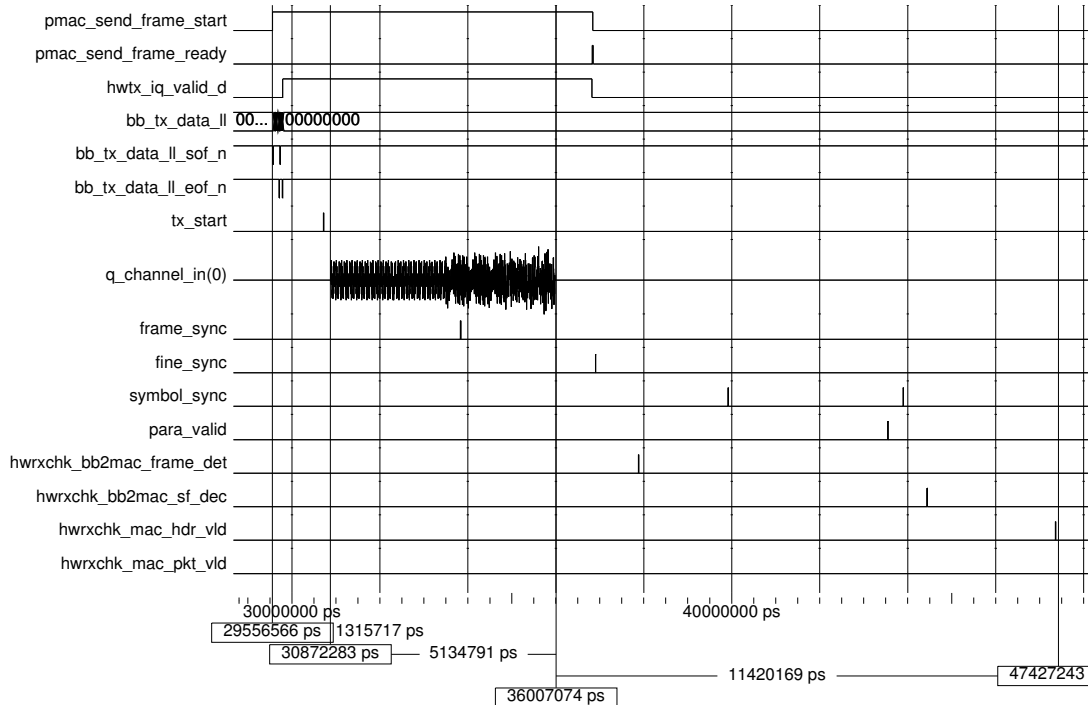


Abbildung 4.2: MAC- und PHY-Zeitverhalten beim Senden und Empfangen eines PHY-Frames (Simulation der Hardwareimplementierung)

Für die weitere Analyse wird das drahtlose Übertragungssystem (PHY- und MAC-Schicht) des EASY-A-Projektes betrachtet. Abbildung 4.2 zeigt einen Ausschnitt aus der Verhaltenssimulation der PHY- und der MAC-Schicht entsprechend der vorigen Abbildung 4.1. Nach dem Start der Übertragung in der MAC-Schicht (*pmac\_send\_frame\_start*) werden die Daten an die PHY-Schicht gesendet. Der Sender startet ca. 1,3  $\mu$ s später mit der Ausgabe des PHY-Frames (*q\_channel\_in*). Erst kurz nach dem Ende der Übertragung des PHY-Frames wird die erfolgreiche Detektierung des Frames signalisiert. Das Signal *symbol\_sync* markiert die Ausgabe der OFDM-Symbole. Das Erste enthält den PHY-Header und das Zweite die Daten in diesem Fall den MAC-Header. Einige Zeit nach der Ausgabe des ersten OFDM-Symbols wird mit dem Signal *para\_valid* die erfolgreiche Dekodierung des PHY-Headers markiert. Das Signal *hwrxchk\_mac\_hdr\_vld* signalisiert den erfolgreichen Empfang des MAC-Headers in der MAC-Schicht. Die Datenübertragung von der MAC-Schicht des Senders bis zur MAC-Schicht des Empfängers dauert somit ca. 18  $\mu$ s. Es wird nur ein MAC-Header einer Länge von 20 Bytes übertragen. Die Übertragung auf dem internen 32-Bit-Datenpfad dauert  $5 \times 8 \text{ ns} = 40 \text{ ns}$ . Die Übertragungsdauer entspricht ca. 123 ns eines 593 ns langen OFDM-Symbols bei einer PHY-Datenrate von 1,3 GBit/s.

Im Folgenden werden die Einzelbeiträge der Verarbeitungslatenzen der PHY-Schicht und des Overheads der MAC-Schicht aufgeführt. Danach werden Verfahren zur Steigerung der Effizienz und des Datendurchsatzes vorgestellt. Dies erfolgt zuerst für einen idealen Kanal ohne Übertragungsfehler und anschließend für einen gestörten Kanal mit Übertragungsfehler.

Folgende Notationen werden benutzt:  $C$  bezeichnet eine Anzahl von Paketen oder Fra-

mes,  $N$  die Länge der Daten in Bytes,  $T$  eine Zeitdauer. Der Typ wird durch den Index spezifiziert. Die  $\lceil x \rceil$  Operation bezeichnet die kleinste natürliche Zahl nicht kleiner als  $x$ . Die  $\lfloor x \rfloor$  Operation bezeichnet die größte natürliche Zahl nicht größer als  $x$ .

#### 4.1. Overhead in der PHY-Schicht

Das Senden eines PHY-Frames kann erst beginnen, wenn genug Daten in den Sendepuffer geschrieben wurden und die Signalverarbeitung soweit fortgeschritten ist, dass mit dem Ende der Ausgabe der Präambel die OFDM-Symbole für den PHY-Header und für die Daten kontinuierlich ausgegeben werden können. Die Sendeverzögerung  $T_{TXdel}$  ist die Zeit vom Sende-Startkommando bis zum Beginn der Ausgabe der Präambel auf dem Kanal<sup>70</sup>. Darin enthalten sind auch die Umschaltzeit zwischen Sende- und Empfangspfad und die Umschaltzeit bzw. die Programmierung der Register bei der Verwendung einer elektronisch verstellbaren Richtantenne. Die Laufzeit des Signals ist abhängig von der Entfernung der Teilnehmer. Im Empfänger kann die Präambelsynchronisierung, die Kanalschätzung und die Dekodierung des PHY-Headers mit festen Latenzen beschrieben werden. Die Empfangsverzögerung  $T_{RXdel}$  ist die Zeit vom Ende des Empfangs des PHY-Frames an der Antenne bis zum Ende des Datentransfers zur MAC-Schicht. Die Dauer der Datendekodierung ist abhängig von den eingesetzten Modulations- und Fehlerkorrekturverfahren (PHY-Datenrate). In [14] werden die Latenzen der PHY-Schicht am Beispiel des eingesetzten OFDM-Basisbandprozessors analysiert und Verfahren zur Reduzierung vorgeschlagen.

Folgende Zeitkomponenten werden durch die PHY-Schicht beigetragen:

1.  $T_{TXdel}$ : initiale PHY-Frame-Ausgabelatenz (Sendeverzögerung),
2.  $T_{PR}$ : Präambeldauer,
3.  $T_{PH}$ : Dauer des PHY-Headers (PHY-Datenrate und Anzahl der Daten  $N_{PH}$  im Beispielsystem konstant),
4.  $T_{PL}$ : Dauer der Übertragung der Daten (abhängig von der PHY-Datenrate und der Anzahl der Daten  $N_{PL}$ ),
5.  $T_{prop}$ : Signallaufzeit (abhängig von der Entfernung der Teilnehmer),
6.  $T_{RXdel}$ : Empfangsverzögerung (abhängig vom Modulations- und Kodierungsverfahren),
7.  $T_{TXRXT}$ : Umschaltzeit zwischen dem Sende- und Empfangspfad im AFE,
8. Umschaltzeit  $T_{SRA}$  und Programmierzeit  $T_{PRA}$  der elektronisch steuerbaren Richtantenne.

#### 4.2. Overhead in der MAC-Schicht

Die MAC-Schicht trägt mit den folgenden Komponenten zum Overhead bei:

1.  $N_{MH}$ : Länge des MAC-Headers,
2.  $N_{AH}$ : Länge des Aggregationsheaders (AH),
3.  $N_{HCS}^{71}$ ,  $N_{FCS}^{72}$ : Länge der Prüfsumme des MAC-Headers und der Nutzdaten

<sup>70</sup> $T_{TXdel}$  hat für die weiteren Berechnungen einen konstanten Wert für alle Datenraten

<sup>71</sup>HCS - Header Check Sum

<sup>72</sup>FCS - Frame Check Sum

#### 4. Verfahren zur Steigerung der Effizienz

4.  $T_{GT}$ : Dauer der Schutzzeit (enthält u.a. Beiträge der PHY-Schicht und Unsicherheiten der Zeitauflösung und der Taktfrequenzen/Taktdrift in der MAC-Schicht).

Folgende Zeiten abstrahieren die Latenzen der PHY-Schicht:

1. Die Dauer des PHY-Frames  $T_{PF}$  beinhaltet die Präambel  $T_{PR}$ , den PHY-Header  $T_{PH}$ , den MAC-Header  $T_{MH}$ , den Aggregationsheader  $T_{AH}$ , die Prüfsummen  $T_{HCS}$ ,  $T_{HCS}$  und die Nutzdaten (Payload)  $T_{PL}$ .
2.  $T_{GT}$  beinhaltet u.a. die Signallaufzeit  $T_{prop}$  und kleine Latenzen, z.B. verursacht durch den Jitter durch Clock-Domain-Übergänge [14] oder andere taktbasierte Unsicherheiten wie z.B. die Taktdrift.
3.  $T_{PHYdel}$  ist die Zeit vom Beginn der Ausgabe der Präambel bis zum Empfang des ersten Bytes in der MAC-Schicht.

#### 4.3. Steigerung des Datendurchsatzes und der Effizienz

Wird die PHY-Datenrate erhöht, so verringert sich die Übertragungsdauer des MAC-Overheads und der Daten zu gleichen Teilen. Im Gegensatz zur kürzeren Übertragungszeit der Nutzdaten des PHY-Frames bleibt der Anteil des PHY-Overheads  $T_{PR} + T_{PH}$  jedoch gleich und somit sinkt die Effizienz mit steigender PHY-Datenrate.

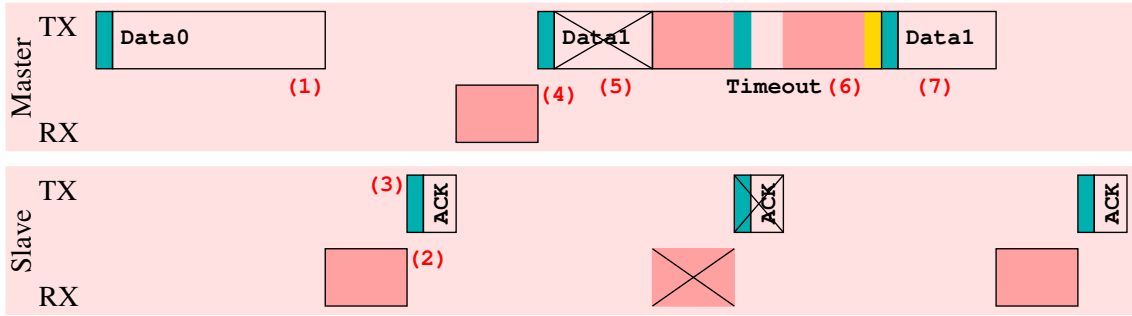
Der Overhead durch Bestätigungen und Neuübertragungen ist abhängig vom Bestätigungsverfahren und den Kanalbedingungen. Die Steigerung des Datendurchsatzes erfolgt durch die Erhöhung des Nutzdatenanteils. Zuerst wird deshalb näher auf die Steigerung des Datendurchsatzes mit den dazugehörigen Bestätigungsverfahren eingegangen, um danach die Auswirkungen auf den Datendurchsatz im fehlerhaften Kanal aufzuzeigen.

Die Datensicherungsschicht soll die zuverlässige Übertragung der Datenpakete sicherstellen. Schlechte Kanalbedingungen oder kurzzeitige Störungen führen zu Paketverlusten. Um diese zu erkennen, wird der Empfang bzw. der Verlust der Pakete bestätigt. Steht eine Vollduplex-Verbindung zur Verfügung, können die Bestätigungen direkt an die Gegenstelle übertragen werden. Im Halbduplex-Betrieb werden die Bestätigungen mit der nächsten Antwort an die Gegenstelle gesendet. Dabei macht sich besonders die Zeit  $T_{RXdel}$  bemerkbar. Abbildung 4.3a veranschaulicht das Problem für eine Halbduplex-Verbindung. Der Medienzugriff wird mit dem Polling-Verfahren gesteuert. Der Master initiiert die Datenübertragung (1) und weist den Slave an, die vorhandenen Daten zu senden. Das Ergebnis der Dekodierung liegt im Slave nach  $T_{RXdel}$  vor (2). Das gilt genauso für den Empfang der Bestätigung (ACK) im Master (3,4). Danach kann das nächste Paket gesendet werden (5). Dieses wird hier nicht korrekt vom Slave empfangen, so dass dieser auch nicht antwortet. Der Master muß also  $2 \times T_{RXdel} + T_{TXdel} + T_{PF}(ACK) + T_{GT}$  warten (6), bis das nicht bestätigte Paket wiederholt werden darf (7).

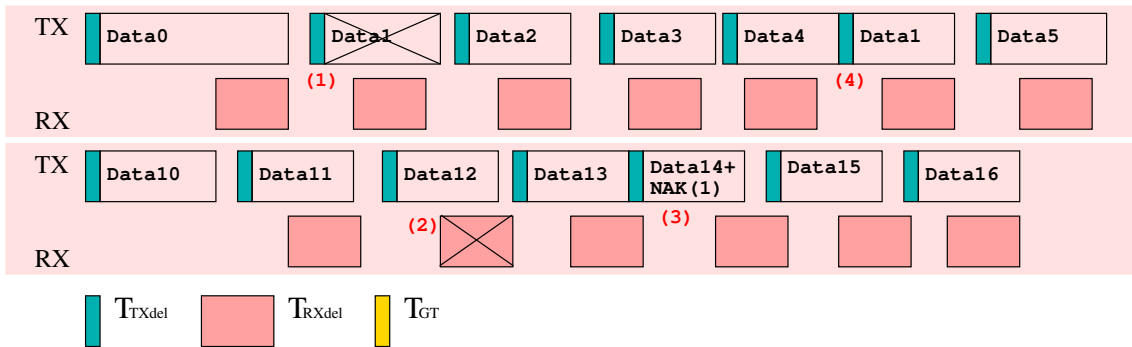
Im vorgestellten MAC-Protokoll kann eine Bestätigung auch innerhalb einer aggregierten MPDU übertragen werden (siehe Abschnitt 5.6.3 auf Seite 91). Damit muß nicht das Ende der Dekodierung abgewartet werden (maximal  $T_{RXdel}$ ), sondern es kann direkt nach dem Übertragungsende mit der eigenen Übertragung begonnen werden. Die fehlenden Bestätigungen werden dann über einen Post-ACK-Block übertragen. Die Dauer der Übertragung lässt sich aus den Parametern des PHY-Headers berechnen. Sonst kann auch der Kanal abgehört werden. Im Empfänger sollte die Verarbeitung des Post-ACK-Blocks bereits beendet sein, bevor eine Antwort gesendet wird.

Abbildung 4.3b zeigt ein Beispiel mit einer Vollduplex-Verbindung. Erstens ist leicht ersichtlich, dass in der gleichen Zeitperiode viel mehr Daten versendet werden. Zweitens

### 4.3. Steigerung des Datendurchsatzes und der Effizienz



(a) Halbduplex-Verbindung



(b) Vollduplex-Verbindung

Abbildung 4.3: Wirkung von  $T_{TXdel}$  und  $T_{RXdel}$  auf den Datenfluss

wird die Übertragung nicht gestoppt, um auf eine Bestätigung zu warten. Die Pakete werden sofort nach dem Eingang versendet, so dass die Lücken zwischen den Paketen eine unterschiedliche Länge haben können.

Das verlorene Paket (1,2) wird nach dem Empfang des dritten Datenpaketes (Data2) durch eine Sequenznummernlücke erkannt und mit der nächsten Möglichkeit ein NAK mitgesendet (3). Nach dem Empfang eines NAKs wird das *angeforderte* Paket bei der nächsten Sendemöglichkeit übertragen (4). Geht ein NAK verloren, muß dieses wiederholt übertragen werden. Bei der Benutzung positiver Bestätigungen muß festgelegt werden, nach welcher Zeit bzw. nach wie vielen Paketen eine Wiederholung gestartet wird, sonst werden womöglich unnötige Übertragungswiederholungen durchgeführt.

Im eingesetzten Übertragungssystem steht *nur* eine Halbduplex-Verbindung zur Verfügung. Um einen hohen Datendurchsatz zu erzielen, muß der Zeitanteil der Nutzdaten gegenüber  $T_{TXdel} + T_{PR} + T_{PH} + T_{RXdel}$  erhöht werden. Weiterhin muß die Auswirkung eines Bitfehlers auf einen kleinen Abschnitt der MPDU begrenzt werden, so dass wenig Daten wiederholt werden müssen. Im Falle eines Totalverlustes z.B. durch einen zerstörten PHY-Header muß das gesamte PHY-Frame neu übertragen werden. Die Nutzdatenlänge kann erhöht werden, indem mehrere Pakete aggregiert werden, sofern das PHY-Frame größere Längen unterstützt.  $T_{RXdel}$  kann verdeckt werden, indem mehrere PHY-Frames hintereinander gesendet werden, ohne auf eine Bestätigung zu warten. Die Art wie die Daten aggregiert und bestätigt werden beeinflusst direkt den Datendurchsatz.

Abbildung 4.4 zeigt eine Übersicht über die Aggregierungsmöglichkeiten mit anschließender Bestätigung im Vergleich zu einer Einzelpaketübertragung mit einer sofortigen Bestätigung. Mit jedem weiteren Optimierungsschritt nach unten wird der MAC-Datendurchsatz und die Effizienz gesteigert. Gleichzeitig steigert sich aber auch die Komplexität des MAC-Protokolls. Das erste Beispiel zeigt eine sofortige Bestätigung (Immediate-ACK)

#### 4. Verfahren zur Steigerung der Effizienz

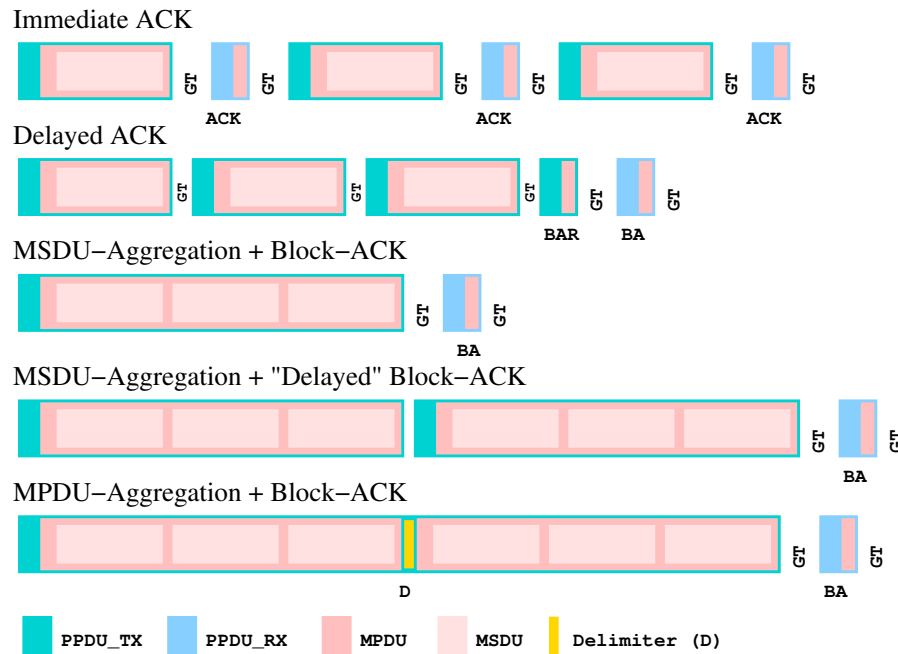


Abbildung 4.4: Aggregations- und Bestätigungsverfahren

nach dem Empfang eines Datenpaketes. Es geht viel Zeit für die Bestätigungen verloren. Deshalb werden diese im zweiten Beispiel im Empfänger gesammelt und nach Anforderung (BAR<sup>73</sup>) als Bestätigungsblock (BA<sup>74</sup>) zurückgesendet. Dieses verzögerte ACK (Delayed ACK) reduziert das Bestätigungsprotokoll auf zwei Pakete. Das BAR- und das BA-PHY-Frame enthalten jeweils die Präambel, den PHY- und den MAC-Header. Der PHY-Overhead lässt sich weiter reduzieren, indem mehrere MSDUs zu einer MPDU innerhalb der MAC-Schicht aggregiert werden. Die MSDUs werden dazu z.B. durch Aggregationsheader getrennt oder die Abschnittslängen im MAC-Header gespeichert. Die erfolgreich empfangenen MSDUs werden mit einem BA direkt (implizit) ohne Anforderung bestätigt. Im nächsten Schritt wird zugelassen, dass mehrere dieser Frames hintereinander gesendet werden dürfen. Die Bestätigung erfolgt implizit mit einem BA nach dem letzten PHY-Frame. Hier wird der PHY- und MAC-Overhead der BAs nach jedem PHY-Frame eingespart. Werden jetzt die MPDUs auch noch aggregiert, reduziert sich der PHY-Overhead (Präambel) weiter. Ein zusätzlicher Trenner (Delimiter) separiert die MPDUs, damit im Falle eines zerstörten Trenners die nächste MPDU gefunden werden kann. Der o.g. AH erübrigt den Delimiter (D).

Abbildung 4.5a und 4.5b zeigen die Abhängigkeiten des MAC-Datendurchsatzes und der Effizienz von der PHY-Datenrate und den Aggregierungs- und Bestätigungsverfahren für das EASY-A-Beispielsystem. Die Datenpaketlänge beträgt 16 KiB. Das Bestätigungspaket enthält keine Nutzdaten. Die drei Kurven zeigen die Ergebnisse der folgenden Varianten:

1. Nach jedem PHY-Frame mit einer MPDU aus einer MSDU wird sofort eine Bestätigung gesendet (Imm-ACK).
2. Acht PHY-Frames mit jeweils einer MPDU aus einer MSDU werden übertragen und danach mit einem Block-ACK bestätigt (Del-ACK 8).

<sup>73</sup>BAR - Block-ACK Request

<sup>74</sup>BA - Block-ACK

#### 4.3. Steigerung des Datendurchsatzes und der Effizienz

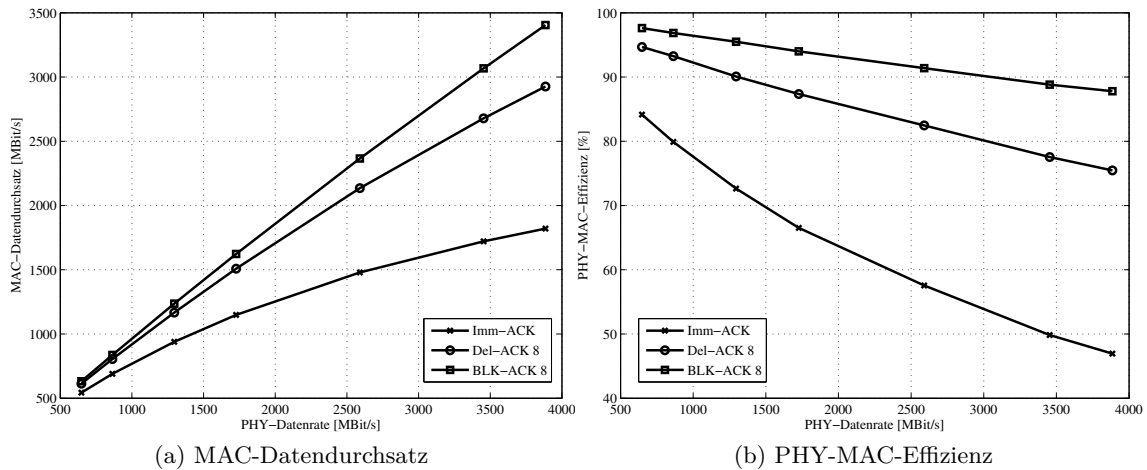


Abbildung 4.5: MAC-Datendurchsatz und Effizienz in Abhängigkeit von der PHY-Datenrate

- Ein PHY-Frame mit acht MPDUs aus jeweils einer MSDU werden übertragen und mit einem Block-ACK bestätigt (BLK-ACK 8).

Die Bestätigungsverfahren haben einen großen Einfluss auf den MAC-Datendurchsatz. Die Effizienz sinkt mit steigender PHY-Datenrate und gleichbleibendem Nutzdatenanteil. Bei einer PHY-Datenrate von 1,3 GBit/s beträgt die Effizienz 95% und bei 3,9 GBit/s 88%. Die Effizienz kann nur noch durch eine weitere Erhöhung des Nutzdatenanteils verbessert werden, indem größere MSDUs zugelassen werden oder mehr MSDUs aggregiert werden, sofern die Parameter des PHY-Frames das zulassen.

##### 4.3.1. Auswirkungen auf den Datendurchsatz im gestörten Kanal

Die Position eines Fehlers im PHY-Frame kann verschiedene Auswirkungen haben. Fehler bei der Präambelerkennung und im PHY-Header führen zum Totalverlust des PHY-Frames. Fehler im MAC-Header wirken sich nicht auf die nachfolgenden MSDUs aus, wenn diese mit einem separaten Header (AH) versehen sind und die Gesamtlängenangabe der PHY-Nutzdaten sowie die Quell- und Zieladresse von der PHY-Schicht geliefert werden<sup>75</sup>. Fehler im Aggregationsheader oder den Nutzdaten einer MSDU wirken sich nur auf die betroffene MSDU selbst aus.

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers bei der Präambelverarbeitung  $p_{PR}$  und bei der Dekodierung des PHY-Headers  $p_{PH}$  können aus Simulationsergebnissen oder Messungen abgeleitet werden. Aus der Restbitfehlerrate  $BER$  (nach der Kanaldekodierung), werden mit (13), (14), (15), (16) und (17) entsprechend die Paketfehlerraten für den MAC-Header  $p_{MH}$ , den Aggregationsheader  $p_{AH}$ , der FCS  $p_{FCS}$ , der Nutzdaten  $p_{PL}$  und der MSDU  $p_{MSDU}$  berechnet.

<sup>75</sup>Das in dieser Arbeit vorgestellte MAC-Protokoll setzt diese Methode ein.

#### 4. Verfahren zur Steigerung der Effizienz

$$p_{MH} = 1 - (1 - BER_{MH})^{8 \cdot N_{MH}} \quad (13)$$

$$p_{AH} = 1 - (1 - BER_{AH})^{8 \cdot N_{AH}} \quad (14)$$

$$p_{FCS} = 1 - (1 - BER_{FCS})^{8 \cdot N_{FCS}} \quad (15)$$

$$p_{PL} = 1 - (1 - BER_{PL})^{8 \cdot N_{PL}} \quad (16)$$

$$p_{MSDU} = 1 - (1 - BER_{MSDU})^{8 \cdot (N_{AH} + N_{PL} + N_{FCS})} \quad (17)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Bestätigungsanforderung und die Bestätigung korrekt empfangen wurden, wird mit (18) berechnet. Dazu muß jeweils der MAC-Header korrekt empfangen werden. Die Bestätigungsanforderung kann mit dem letzten PHY-Frame eines Blockes mitgesendet werden.

$$p_{RqACK} = [(1 - p_{PR})(1 - p_{PH})(1 - p_{MH})]^2 \quad (18)$$

Eine fehlende Bestätigung wird durch eine Zeitüberschreitung beim Warten auf den Empfang eines MAC-Headers festgestellt. Die Länge der Wartezeit  $T_{TIO}$  hängt von den folgenden Verzögerungszeiten ab:  $T_{TXdel}$ ,  $T_{RXdel}$ ,  $T_{PF}$ ,  $T_{GT}$  und wird nach (19) berechnet.  $T_{PF\_Res}$  enthält entweder die Dauer eines ACK-PHY-Frames ohne Nutzdaten nach (22) oder die Dauer eines PHY-Frames mit Nutzdaten nach (23).

$$T_{TIO} = T_{RXdel} + 2T_{GT} + T_{PF\_Res} \quad (19)$$

$$T_{PF\_Res\_ACK} = T_{ACK} + T_{TXdel} \quad (20)$$

$$T_{PF\_Res\_PF} = T_{PF} + T_{TXdel} \quad (21)$$

$$T_{ACK} = T_{PR} + T_{PH} + T_{MH} \quad (22)$$

$$T_{PF} = T_{PR} + T_{PH} + T_{MH} + T_{MPDU} \quad (23)$$

Geht das letzte PHY-Frame eines Blockes (siehe BLK-ACK) verloren, so geht auch die Bestätigungsanforderung verloren. Als Fehlerbehandlung kann nun das komplette letzte PHY-Frame oder nur ein ACK-Frame gesendet werden. Das Wiederholen der kompletten Daten ist nicht sinnvoll, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass das PHY-Frame durch einen Synchronisierungsfehler oder durch einen fehlerhaften PHY-Header signifikant geringer ist als die Paketfehlerrate (PER). Eine andere Möglichkeit ist, dass die Anzahl der folgenden Blöcke auch in jedem PHY-Frame mitgesendet wird und das ACK automatisch gesendet wird. Das hilft aber nicht bei variablen PHY-Frame-Längen, da der Empfänger und auch der Sender zu diesem Zeitpunkt nicht wissen, wie lang die PHY-Frames jeweils sind. So kann der Empfänger den Sendestart der (impliziten) Bestätigung nach dem letzten PHY-Frame nicht bestimmen. Die Bestätigung kann auch aufgrund eines fehlerhaften MAC-Headers ausbleiben. Die mittlere Dauer der Übertragungswiederholungen  $T_{ACKR}$  wird nach (24) berechnet [51]. Dabei wird von einem PHY-Frame ( $T_{PF}$ ) pro Block/Bestätigung ausgegangen. Dieses wird komplett neu übertragen und beschreibt damit den schlechtesten Fall.  $C_R$  definiert die Anzahl der Übertragungswiederholungen bis eine MSDU verworfen wird.

$$T_{ACKR} = \sum_{n=1}^{C_R} (nT_{TIO} + (n-1)T_{PF})(1 - p_{RqACK})^{(n-1)} p_{RqACK} \quad (24)$$

Die Anzahl der erfolgreich übertragenen Nutzdaten  $N_{PLsucc}$  wird mit (25) berechnet.

$$N_{PLsucc} = (1 - p_{PR})(1 - p_{PH})(1 - p_{MH})(1 - p_{AH})(1 - p_{PL})(1 - p_{FCS}) \cdot 8 \cdot N_{PL} \quad (25)$$



#### 4.3. Steigerung des Datendurchsatzes und der Effizienz

Je nach Implementierung des MAC-Protokolls ist es möglich, dass ein oder mehrere der Fehlerwahrscheinlichkeiten  $p_{PR}$ ,  $p_{MH}$ ,  $p_{AH}$  keinen Einfluss auf die Übertragung der Nutzdaten nehmen.

Abschließend kann der mittlere MAC-Datendurchsatz  $S$  nach (26) berechnet werden.

$$S = \frac{N_{PLsucc}}{T_{PF} + T_{ACKR}} \quad (26)$$

##### 4.3.2. Berechnungen für ein reales Kommunikationssystem

Basierend auf den Parametern des verfügbaren digitalen OFDM-Basisbandprozessors des EASY-A Projektes [49, 50] wird im Folgenden gezeigt, wie diese den MAC-Datendurchsatz und die MAC-Effizienz bei unterschiedlichen PHY-Datenraten beeinflussen. Die Berechnungen werden für fehlerfreie und fehlerbehaftete Übertragungen durchgeführt.

Der digitale Basisbandprozessor benutzt ein OFDM-Verfahren mit BPSK, 4-QAM oder 16-QAM als Unterträgermodulation und einen Faltungscode als Vorwärtsfehlerkorrekturverfahren.

- Die Dauer eines OFDM-Symbols  $T_{Sym}$  ist konstant.
- $N_{Sym}$  ist die Anzahl der Datenbytes pro OFDM-Symbol im benutzten Modulations- und Kodierungsverfahren.
- $C_P$  ist die Anzahl der PHY-Frames pro Block-ACK.
- $C_{AM}$  ist die Anzahl der MPDUs pro PHY-Frame.
- $C_M$  ist die Anzahl der MSDUs pro MPDU.
- $C_R$  ist die Anzahl der Übertragungswiederholungen bis eine MSDU verworfen wird.

Tabelle 4.1 zeigt die Parameter in Abhängigkeit ausgesuchter Modulationsarten und Codierarten.

Der MAC verarbeitet eingehende MSDUs, in diesem System Ethernet-Pakete, wie folgt: Jedes eingehende Paket wird um einen Aggregationsheader (AH) erweitert. Die Standard-Ethernetpaketlänge beträgt 1514 Bytes bzw. 1518 bei Verwendung von VLAN-Tagging (siehe [52]). Die maximale Länge einer MSDU beträgt 65535 Bytes. Eine MPDU hat eine maximale Länge von 131072 Bytes. Es können also bis zu 85 Standard-Ethernet-Pakete maximaler Länge mit einem PHY-Frame übertragen werden. Die Sendedauer des Nutzdatenanteils eines PHY-Frames beträgt ein Vielfaches der OFDM-Symboldauer  $T_{Sym}$ . Alle Nutzdaten werden mit der gleichen PHY-Datenrate kodiert. Die Übertragungsdauer der PHY-Nutzdaten  $T_{MPDU}$  wird nach (27) berechnet, die Übertragungsdauer eines PHY-Frames  $T_{PF}$  nach (28), die Übertragungsdauer einer Sequenz von PHY-Frames  $T_{PFB}$  nach (29) und die absolute Bitübertragungszeit  $T_{PLA}$  nach (30).  $N_{PL}$  ist für alle MSDUs gleich.

$$T_{MPDU} = \left\lceil \frac{C_{AM} (N_{MH} + C_M (N_{AH} + N_{PL} + N_{FCS}))}{N_{Sym}} \right\rceil T_{Sym} \quad (27)$$

$$T_{PF} = T_{PR} + T_{PH} + T_{MPDU} \quad (28)$$

$$T_{PFB} = C_P (T_{TXdel} + T_{PF}) \quad (29)$$

$$T_{PLA} = \frac{N_{PL}}{N_{Sym}} T_{Sym} \quad (30)$$

#### 4. Verfahren zur Steigerung der Effizienz

Tabelle 4.1: EASY-A OFDM-PHY- und MAC-Parameter

Modulation	BPSK	4-QAM	16-QAM	16-QAM	Quelle	Verzögerung
Coderate $R$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$3/4$	$T_{coarse\_sync}$	$3 \mu s$
DR [ $MBit/s$ ]	648	1295	2590	3885	$T_{Frame\_det}$	$6 \mu s$
$N_{Sym}$	48	96	192	288	$T_{DEC\_PH}$	$13 \mu s$
$T_{Sym}$	$0,593 \mu s$				$T_{DEC\_DATA}$	$16 \mu s$
$T_{PR}$	$3,914 \mu s$					
$T_{PH}$	$0,593 \mu s$					
$T_{TXdel}$	$2 \mu s$					
$T_{RXdel}$	$12 \mu s$					
$T_{PHYdel}$	$17 \mu s$					
$T_{Guard}$	$4 \mu s$					
$N_{PH}$	48					
$N_{HCS}, N_{FCS}$	4					
$N_{MH}$	$16 + N_{HCS}$					
$N_{AH}$	12					
$N_{MSDU}$	65535					
$N_{MPDU}$	131072					
$T_{ACK}$	$T_{PR} + T_{PH} + T_{MH} = 5,1 \mu s$					

Das gesendete PHY-Frame ist komplett nach der Zeit  $T_{TXDel} + T_{PF} + T_{RXdel}$  an die MAC-Schicht des Empfängers übergeben worden. Eine Bestätigung kann somit frühestens nach  $T_{TXDel} + T_{ACK} + T_{RXdel} = 19 \mu s$  generiert werden, wenn das Anforderungspaket keine Nutzdaten enthält. Ein Bestätigungszyklus dauert so minimal  $2 \times 19 \mu s$ . Der MAC-Datendurchsatz  $S$  und die PHY-MAC-Effizienz  $E$  für den ungestörten Kanal werden nach (31) und (32) berechnet. Tabelle 4.2 gibt eine Übersicht von  $S$  und  $E$  mit unterschiedlichen Parametersätzen von  $C_P$ ,  $C_{AM}$ ,  $C_M$  und  $N_{PL}$ . Abbildung 4.6a auf der nächsten Seite zeigt den Datendurchsatz abhängig von der Paketlänge und ohne Übertragungsfehler bei einer PHY-Datenrate von 1,3 GBit/s. Anmerkung: Die Kurve von BLK-ACK-8 endet bei der maximalen PHY-Frame-Länge von  $8 \times 16 KiB = 128 KiB$ .

$$S = \frac{C_P \cdot C_{AM} \cdot C_M \cdot N_{PL}}{T_{PFB} + T_{ACK} + T_{TXdel} + 2 \cdot T_{RXdel}} \quad (31)$$

$$E = \frac{C_P \cdot C_{AM} \cdot C_M \cdot T_{PL}}{T_{PFB} + T_{ACK} + T_{TXdel} + 2 \cdot T_{RXdel}} \quad (32)$$

Für die Berechnungen im gestörten Kanal nach (26) gelten folgende Festlegungen:  $T_{PFB} = T_{ACK}$ ,  $T_{GT} = 4 \mu s$ ,  $p_{PR} = p_{PH} = 0$  sowie  $C_P$ ,  $C_{AM}$ ,  $C_M$  und  $N_{PL}$  aus Tabelle 4.2.  $BER_{MH}$  und  $BER_{MSDU}$  entsprechen der BER in der Legende des Diagramms. Abbildung 4.6b zeigt den MAC-Datendurchsatz bei einer PHY-Datenrate von 1,3 GBit/s abhängig von der Paketlänge und der Bitfehlerrate. Aus dem Diagramm geht hervor, dass für jede Bitfehlerrate eine Paketlänge für maximalen Durchsatz existiert. Die steigende Flanke einer Kurve wird durch die Steigerung der MAC-Effizienz durch mehr Nutzdaten hervorgerufen. Die fallende Flanke wird durch die steigende Paketfehlerrate verursacht. Abbildung 4.7a und 4.7b auf Seite 60 zeigen die Ergebnisse bei einer PHY-Datenrate von 3,9 GBit/s.

#### 4.4. Wechselbeziehungen zwischen der PHY- und der MAC-Schicht (Cross-Layer Design)

Tabelle 4.2: Berechnung von  $S$  und  $E$  mit verschiedenen Bestätigungsverfahren und PHY-Datenraten

PHY-Datenrate	[MBit/s]				1295		2590		3885	
Bestätigungs- schema	$C_P$	$C_{AM}$	$C_M$	$N_{PL}$	$E$	$S$	$E$	$S$	$E$	$S$
				[kB]	[%]	[MBit/s]	[%]	[MBit/s]	[%]	[MBit/s]
Immediate ACK	1	1	1	1,5	20	255	11	283	9	295
				8	58	740	40	1039	31	1196
				16	73	940	58	1479	47	1820
Delayed Block-ACK	2	1	1	16	82	1057	70	1794	60	2322
	4				87	1127	78	2008	69	2693
	8				90	1166	82	2135	75	2926
Block-ACK	1	2	1	16	84	1088	73	1873	64	2492
		4			91	1181	84	2175	78	3024
		8			95	1234	91	2363	88	3398

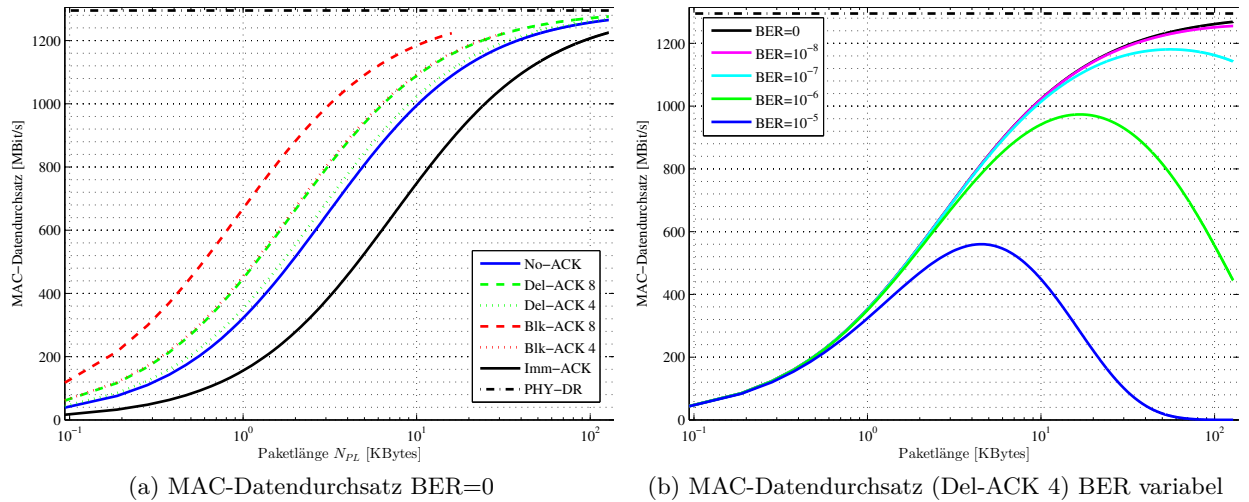


Abbildung 4.6: MAC-Datendurchsatz in Abhängigkeit von der Paketlänge und der Bitfehler rate bei einer PHY-Datenrate von 1,3 GBit/s

Die Aggregation von MSDUs und/oder MPDUs erzeugt längere PHY-Frames. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die maximale Länge eines PHY-Frames von den Kanaleigenschaften abhängig ist. Beim Empfang eines PHY-Frames wird nach der Präambel-synchronisierung eine Kanalschätzung durchgeführt. Diese gilt dann für das gesamte PHY-Frame und berücksichtigt keine weiteren Änderungen des Kanals, sofern keine periodische Kanalschätzung durchgeführt werden kann.

#### 4.4. Wechselbeziehungen zwischen der PHY- und der MAC-Schicht (Cross-Layer Design)

Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, wie der Datendurchsatz und die Effizienz durch die Reduzierung des zeitlichen Aufwandes in der PHY- und der MAC-Schicht gesteigert wurden. Die Übertragungswiederholung fehlerhafter Pakete innerhalb der MAC-Schicht ver-

#### 4. Verfahren zur Steigerung der Effizienz

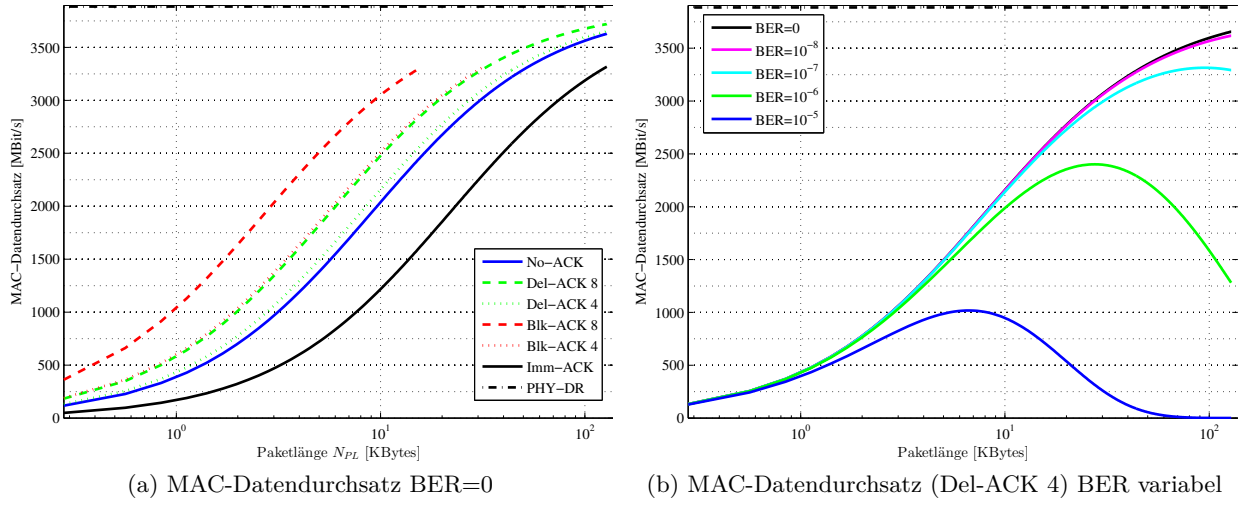


Abbildung 4.7: MAC-Datendurchsatz in Abhängigkeit von der Paketlänge und der Bitfehlerrate bei einer PHY-Datenrate von 3,9 GBit/s

hindert, dass diese Übertragungsfehler durch Protokolle der höheren Schichten korrigiert werden müssen. Das erhöht die Performanz des Systems (siehe [53]), da viele Protokolle davon ausgehen, dass die Verbindung quasi fehlerfrei arbeitet und Paketverlust nur durch eine überlastete Verbindung auftreten (siehe TCP in [16]) kann.

An dieser Stelle wird nun auf Verfahren und Maßnahmen zur Reduktion des PHY-Overheads eingegangen. Dabei wird zwischen der Reduzierung der Verarbeitungs- und der Übertragungszeit unterschieden.

##### 4.4.1. Reduzierung der Verarbeitungszeit/-latenz

Die Verarbeitungszeit kann durch Anpassung der digitalen Basisbandalgorithmen auf einen hohen Durchsatz und eine niedrige Latenz optimiert werden. Das kann auch zur Folge haben, dass sich der Hardwareaufwand (Ressourcenbedarf) und somit auch der Stromverbrauch erhöhen. Die spekulative Dekodierung aus [14] vermeidet die Ausführung der Kanaldekodierung (RS), falls die im RS-Block mitgesendete Prüfsumme (FCS) mit der der Daten übereinstimmt. Dadurch verringert sich  $T_{RXdel}$  und eine angeforderte Bestätigung kann früher gesendet werden.

Eine Verlegung von Elementen des MAC-Headers (SRC, DST, ACK) in den PHY-Header ermöglicht eine schnellere Ausgabe an die MAC-Schicht, da der MAC-Header erst dekodiert werden kann, wenn die PHY-Datenrate und FEC-Parameter aus dem PHY-Header bekannt sind. Dadurch ergeben sich weitere Latenzen bei der Dekodierung der Daten. Diese Zeit kann genutzt werden, um z.B. Bestätigungen zu verarbeiten. Auch hier wird wieder  $T_{RXdel}$  verringert.

In [54] wurde ein Aggregierungsverfahren (AFR) vorgestellt. Dabei werden große Pakete in gleich große Fragmente zerlegt, um die Paketfehlerrate zu verringern, indem weniger Bits einem Paket zugeordnet werden. Die Fragmentinformation wird nach dem MAC-Header abgelegt. Simulationen zeigen, dass es eine optimale Fragmentlänge gibt und dass es nicht notwendig ist, vor dem Senden zu warten, um Pakete auf eine bestimmte Größe zu aggregieren (IEEE 802.11 DCF).

In [51] wurde ein Aggregierungsverfahren (HD-FABA) für den UHR-C-Demonstrator des EASY-A-Projektes vorgestellt. Die PHY-Datenrate beträgt 5 GBit/s brutto. Es werden

ein analytisches Modell entworfen und eine Simulation durchgeführt. Weiterhin wurden die Header und die Bestätigungen mehrfach in einem Frame übertragen. Dadurch ließ sich der Datendurchsatz weiter steigern, da die Anzahl der Übertragungswiederholungen durch zerstörte Header reduziert wurde.

#### 4.4.2. Reduzierung der Übertragungszeit

Hybride ARQ (HARQ) Verfahren reduzieren die Anzahl der neu zu übertragenden Daten bei möglichen Übertragungsfehlern. Abhängig vom HARQ-Typ werden das gesamte PHY-Frame oder nur Teile (Paritätsinformationen) neu übertragen. Schwierige Übertragungsbedingungen können die Übertragung des gesamten PHY-Frames erfordern. Die empfangenen Soft-Bit-Informationen werden dann mit den alten innerhalb der PHY-Schicht kombiniert (*Chase Combining*) [55]. Selbst wenn die Frames einzeln nicht dekodierbar sind, so kann eine Dekodierung nach der Kombination erfolgreich sein. Die Symbolinformationen der PHY-Frames müssen dazu in der PHY-Schicht zwischengespeichert werden. Mit dem *Incremental Redundancy* (IR) Verfahren werden unterschiedliche Sätze von Paritätsinformationen im Sender generiert (z.B. ein Satz mit nur jedem dritten Paritätsbit u.s.w.). Diese werden dann nach Anforderung nacheinander übertragen. Dabei kann auch die Modulationsart variieren. Die Anforderung weiterer Daten erfolgt jeweils durch ACKs bzw. NAKs. Hier ist ein enges Zusammenspiel der PHY- und MAC-Schicht erforderlich und setzt eine schnelle latenzarme Übertragung und Dekodierung der ACKs/NAKs voraus.

In [56] wird der Datendurchsatz für den IEEE-802.15.3-Standard mit HARQ-Typ-I (Code Combining) analysiert. Die optimale Paketlänge ist für den maximalen Datendurchsatz mit und ohne HARQ ungefähr gleich. Mit steigender Paketlänge konvergiert der Datendurchsatz bei Einsatz des HARQ auf die Hälfte des Maximums und geht ohne HARQ gegen Null.

In [57] wird die RS-Dekodierung erst bei einer falschen FCS ausgeführt. Die unkorrigierbaren RS-Blöcke werden neu angefordert, d.h. die Übertragungswiederholungen werden auf der Ebene der RS-Blöcke durchgeführt. Dieses Verfahren erfordert eine komplexere Pufferstruktur. Zum einen wird der RS im MAC bei Bedarf ausgeführt. Nicht dekodierbare RS-Blöcke müssen neu angefordert werden. Die Sequenznummernvergabe verlagert sich auf die RS-Block-Ebene. Zum anderen blockiert ein fehlerhafter RS-Block bei einer Überschneidung mit einem Paketende (FCS) und einem Paketanfang (Aggregationsheader) gleich zwei Pakete. Zusätzlich verringert sich der Datendurchsatz durch den Einsatz einer Prüfsumme für jeden RS-Block.

In [58] wird ein Cross-Layer ARQ (CL-ARQ) vorgestellt. Die ACKs bzw. NAKs werden innerhalb der PHY-Schicht ausgetauscht. Dieses Verfahren ist mit dem eingesetzten EASY-A-PHY prinzipiell machbar, aber durch die hohen PHY-Latenzen unpraktikabel und hätte keine Auswirkung auf die Latenzen des Gesamtsystems, da die PHY-Latenzen ( $T_{RXdel}$ ) dadurch nicht eliminiert werden. Weiterhin werden Teile der MAC-Funktionalität in den PHY verlegt bzw. dupliziert, was die Komplexität des Systems weiter erhöht.

#### 4.5. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Komponenten identifiziert, die für den Datendurchsatz und die Effizienz verantwortlich sind. In der MAC-Schicht tragen die Komponenten des MAC-Protokolls zu einer Vergrößerung der Übertragungsdauer des PHY-Frames bei. In der PHY-Schicht haben die Latenzen aus der digitalen Basisbandverarbeitung Einfluss auf die Übertragungs- und Dekodierungsdauer. Der PHY-Overhead trägt signifikant zur Reduzierung des Datendurchsatzes bei. Eine Reduzierung des PHY-Overheads ist deshalb notwen-

#### 4. Verfahren zur Steigerung der Effizienz

dig, um hohe Datendurchsätze zu erreichen. Die Paketaggregation in der MAC-Schicht reduziert den PHY-Overhead durch die Übertragung weniger aber längerer PHY-Frames. Das Sammeln von Bestätigungen ermöglicht die Übertragung mehrerer PHY-Frames hintereinander und reduziert so Wartezeiten, die sonst nach jedem PHY-Frame wirksam würden.

Die Auswirkungen im gestörten Kanal wurden am Beispiel eines verfügbaren OFDM-Basisbandprozessors gezeigt. Dabei wird ersichtlich, dass abhängig von der Bitfehlerrate eine Paketlänge existiert, die einen maximalen Datendurchsatz zur Folge hat. Weiterhin wurden Verfahren vorgestellt, in denen die enge Kooperation beider Schichten zu einem höheren Datendurchsatz führt.

Die Steigerung des Datendurchsatzes wurde durch die Reduzierung des Overheads und der Übertragungsdauer erreicht. Steht ein Kanal mit mehreren Datenströmen (MIMO, STBC) zur Verfügung, können gleichzeitig mehrere Übertragungen durchgeführt werden. Der technische Aufwand dieses Verfahrens lohnt sich aber erst, wenn die einzelnen Datenströme effizient übertragen werden können.

## 5. Hardwareimplementierbares MAC-Protokoll für drahtlose Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung

In diesem Kapitel wird ein MAC-Protokoll für Datenübertragungen mit hochdirektionale Verbindungen im 60-GHz-Band vorgestellt. Basierend auf das vom Autor dieser Arbeit in [2] vorgestellte Kommunikationssystem für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen wird das MAC-Protokoll um folgende Fähigkeiten erweitert: Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen, Multi-Hop-Betrieb, Beamsteering-Unterstützung und Teilnehmersuche.

Der Punkt-zu-Mehrpunkt- und der Multi-Hop-Betrieb erfordern die Adressierung der Teilnehmer und die Ausrichtung der Antenne anhand der Nutzeradresse. Die Teilnehmersuche sucht die erreichbaren Teilnehmer in der Umgebung und ermittelt so die notwendigen Antennenausrichtungen zum Erreichen der Kommunikationspartner. Mit Hilfe von vorberechneten oder während des MAC-Betriebs gesammelten Routinginformationen findet ein Paket seinen Weg auch über mehrere Stationen zum Ziel.

Die Komponenten des Datenpfades des MAC-Protokolls sollen komplett in einer FPGA-Plattform integrierbar sein. Dabei sollen alle Szenarien mit der gleichen Hardwarekonfiguration unterstützt werden. Der Einsatz von Software soll nur für die Konfiguration und die Verwaltung notwendig sein, um einen hohen Datendurchsatz und geringe Verarbeitungslatenzen zu erreichen.

Im Folgenden werden die in der Motivation vorgestellten Szenarien systematisiert und der Stand der Technik aufgeführt. Anschließend wird der Aufbau des MAC-Protokolls anhand des Strukturmodells in Abbildung 5.2 auf Seite 66 erläutert. Die Funktionen werden dazu nach OSI-Schichten sortiert. Eine Anwendungsschnittstelle bietet direkten Zugriff auf den Übertragungskanal. Dazu sind Funktionen der MAC-Schicht für den Medienzugriff und zusätzliche Hardwaremodule in der PHY-Schicht notwendig. Basierend auf den vorgestellten Funktionen, werden der Protokollablauf und die benötigten Paketstrukturen entwickelt. Zum Schluß wird auf die Schnittstellen zu höheren Schichten eingegangen.

### 5.1. Einsatzszenarien und bekannte Implementierungen

Die Einsatzszenarien werden nach der Art der Verbindung zwischen den Teilnehmern unterteilt (siehe Abschnitt 2.6 auf Seite 17). Die Teilnehmer kommunizieren paarweise über eine gerichtete Verbindung. Soll ein Datenpaket an mehrere Teilnehmer übermittelt werden, müssen diese nacheinander angesprochen werden (TDMA). Hinsichtlich der Ende-zu-Ende-Latenzen reduziert das die mögliche Anzahl der Teilnehmer drastisch, wenn hohe Datenraten bei kleinen Latenzen gefordert werden. Wie sich die Anzahl der Teilnehmer auf die Datenrate und die Latenzen auswirkt, ist im Abschnitt 5.4.8 beschrieben.

Das Kommunikationssystem besteht aus einem Masterknoten und einem oder mehreren Slaveknoten. Ist nur ein Slaveknoten vorhanden, spricht man von einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung. Sind mehrere Slave-Knoten direkt vom Master erreichbar spricht man von einer Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindung. Zwischen den jeweiligen Knoten können auch noch Zwischenknoten liegen. Eine direkte Verbindung ohne Zwischenknoten bezeichnet man als Single-Hop und eine Verbindung mit Zwischenknoten als Multi-Hop-Verbindung.

Abbildung 5.1 wurde mit Hilfe der Simulationsumgebung generiert und zeigt eine Anordnung von Knoten mit kombinierten Szenarien (siehe Kapitel 6 ab Seite 97). Die Knoten M0 und S1 alleine beschreiben das Single-Hop Punkt-zu-Punkt-Szenario. Die Knoten M0, S6, S7 und S8 beschreiben ein Multi-Hop-Szenario in dem die Knoten hintereinander verkettet sind (Daisy-Chain). Fällt ein Knoten aus, so ist die Kette unterbrochen. Sofern es das MAC-Protokoll zulässt, können die Einzelabschnitte noch Daten miteinander austauschen, verlieren aber nach einer Weile die zeitliche Synchronisation zueinander (siehe

Abschnitt 5.4.8.2 auf Seite 85). Die Knoten M0, S2, S3, S4 und S5 bilden ein komplexes Szenario indem die Knoten auch über alternative Verbindungen erreichbar sind. Die Konnektivität zwischen den Knoten wird über eine Verbindungsmatrix definiert.

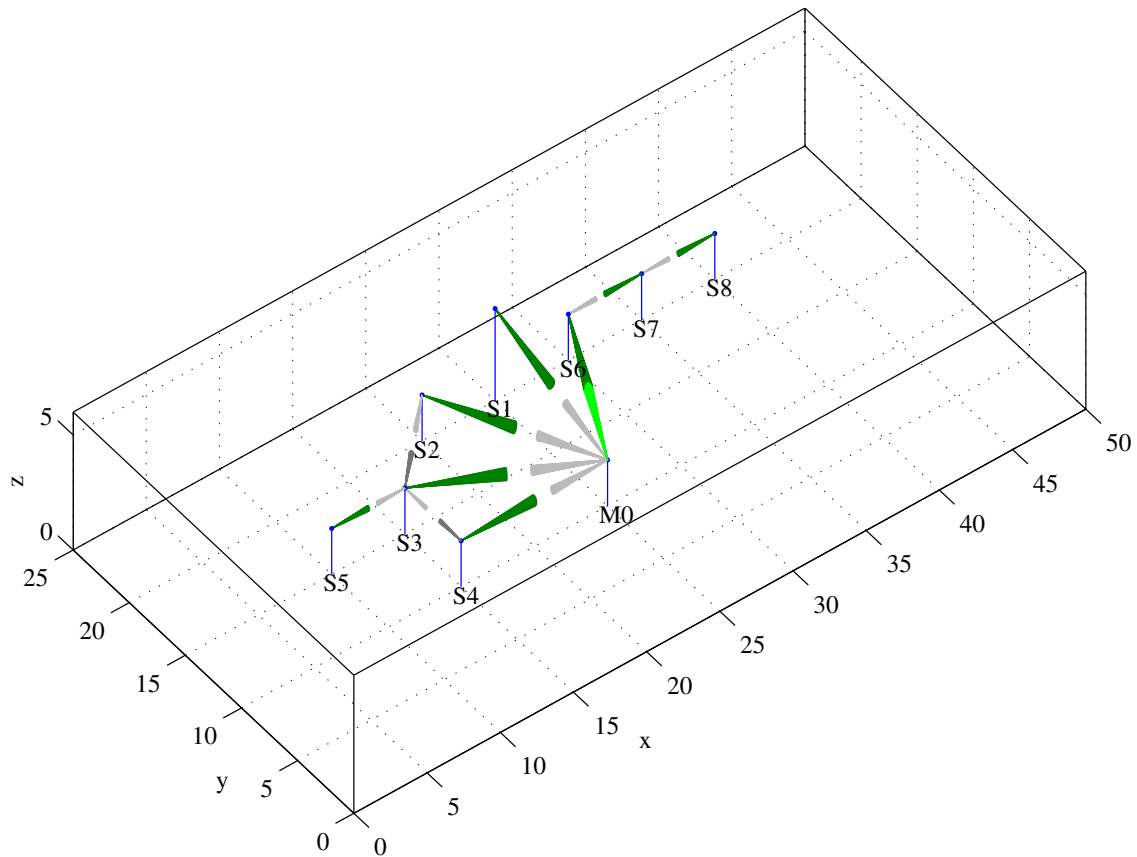


Abbildung 5.1: komplexes Szenario: Punkt-zu-Punkt-, Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen im Single- und Multi-Hop-Betrieb

### 5.1.1. Punkt-zu-Punkt-Verbindung

Mit einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung lassen sich die Gerätesynchronisierung, das Kioskszenario, die Kabelersatzanwendungen und Richtfunkübertragungsstrecken (Backhaul) realisieren. Es sind nur zwei Teilnehmer an der Kommunikation beteiligt. Als Medienzugriffsverfahren eignen sich z.B. das Polling-Verfahren bei dem ein Master die Kommunikation mit dem Slave steuert oder TDD bei dem der Zugriff in Sende- und Empfangszeitabschnitte eingeteilt ist. Das Polling-Verfahren unterstützt QoS durch die Ressourcenzuteilung (Abfragezyklus) über den Master. Beim TDD muß eine Zugriffsverteilung vereinbart werden. Weiterhin müssen beide Teilnehmer zeitlich synchronisiert sein, damit ein kollisionsfreier Zugriff möglich ist. Steht eine Vollduplex-Verbindung für jede Richtung zur Verfügung, kann jeder Teilnehmer wahlfrei auf den Kanal zugreifen.

In [2] wurde durch den Autor dieser Arbeit ein 60-GHz-Kommunikationssystem für Kabelersatzanwendungen vorgestellt. Ein polling-basierter MAC koordiniert den Zugriff auf das Medium im Halbduplex-Verfahren. Aufgrund der begrenzten PHY-Datenrate von 1,3 GBit/s und dem benutzten Halbduplex-Verfahren kann nur die Hälfte der Datenrate eines Gigabit-Ethernetkabels gleichzeitig in beide Richtungen übertragen werden. Jedoch erzeugt die Anwendung (HD-Videoübertragung) asymmetrische Datendurchsätze mit ca.



1 GBit/s vom Master zum Slave und wenige MBit/s in Rückrichtung, so dass die PHY-Datenrate wiederum ausreichend ist. Gleichzeitig können mit dieser Lösung Halbduplex-Backhaul-Verbindungen kleiner bzw. großer Entfernungen entsprechend dem verfügbaren Link-Budget aufgebaut werden.

IBM präsentierte in [59] ein Proof-of-Concept für eine unidirektionale 2-GBit/s-Datenverbindung für unkomprimierte HDTV-Übertragungen. Die Autoren beschrieben ein Single-Carrier DQPSK-Modulationsverfahren mit einer verketteten FEC für eine robuste Übertragung.

Die Firma SIBeam präsentierte in [60] einen Chipsatz für eine unkomprimierte Videoübertragung mit einer Datenrate von maximal 4 GBit/s. Die Patch-Array-Antenne ermöglicht Beamforming (NLOS) über kurze Distanzen bis 10 m. Der Chipsatz ist in kommerziellen Produkten erhältlich und basiert auf die WirelessHD-Spezifikation [40].

In [61] wird eine unidirektionale DBPSK-Verbindung mit einer PHY-Datenrate von 804 MBit/s vorgestellt. Die Hornantenne ermöglicht eine Entfernung von bis zu 10 m. Der Basisbandprozessor ist in einem FPGA implementiert.

In [62] wurde eine Lösung für große Distanzen mit einem stark fokussierten Strahl durch eine Parabolantenne vorgestellt. Die Single-Carrier ASK-Modulation mit einer Datenrate von 1,25 GBit/s ermöglicht eine Distanz von 1,4 km.

### 5.1.2. Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindung

Reine Single-Hop Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen existieren nur, wenn sich die Kommunikation zwischen dem Hauptknoten und den jeweiligen Endknoten abspielt, wie z.B. in einem Multicast-Netzwerk. So können damit z.B. mehrere Video- oder Informationsanzeigen mit Multimediadatenströmen versorgt werden. Ein (Büro-)Datennetzwerk hingegen erfordert Multi-Hop-Fähigkeiten, um Daten auch zwischen den Teilnehmern respektive den Endknoten auszutauschen.

In [5] wurde ein 60-GHz-Kommunikationssystem vorgestellt, das eine robuste Datenübertragung über redundante Verbindungen ermöglicht, um das in den Passagiersitzen eingebaute *in-flight Entertainment* System mit einer drahtlosen Datenverbindung zu versorgen. Dieser Demonstrator wurde in ein Flugzeug-Mock-Up eingebaut. Eine Blockade der Richtungs-Verbindung durch umherlaufende Personen wird durch eine zweite Verbindung abgefangen. Die Entfernung der Sitze zu den APs beträgt ca. 3 m und die verfügbare PHY-Datenrate 240 MBit/s. Die robuste MAC-Lösung für die redundanten Verbindungen wurde durch den Autor dieser Arbeit entwickelt und in die FPGA-Hardware integriert (siehe Abschnitt 7.1).

In [63] wird ein Demonstrator mit acht Antennensektoren vorgestellt. Jeder Sektor wird jeweils mit einer Hornantenne abgedeckt. Der gemessene Datendurchsatz des TDMA-MAC beträgt 648 MBit/s.

Tabelle 5.1 zeigt eine Übersicht publizierter Demonstratoren und kommerziell verfügbarer Kommunikationslösungen im 60-GHz-Band.

**Backhaul-Straßenzugszenario** Im Straßenzugszenario werden Basisstationen (Small Cells) z.B. entlang einer Straße über eine verkettete Richtfunk-Backhaul-Verbindung mit dem Kernnetz des Betreibers verbunden. Jeder Zwischenknoten hat zwei Nachbarn, mit denen jeweils abwechselnd kommuniziert wird. Dazu wird der Antennenstrahl jeder Backhaul-Station vor der Kommunikation entsprechend ausgerichtet. Die maximale Anzahl der möglichen Zwischenverbindungen ist abhängig vom geforderten Antwortzeitverhalten (Round-Trip-Time) zwischen dem Kernnetz und den einzelnen Stationen. Dieses Szenario steht mit

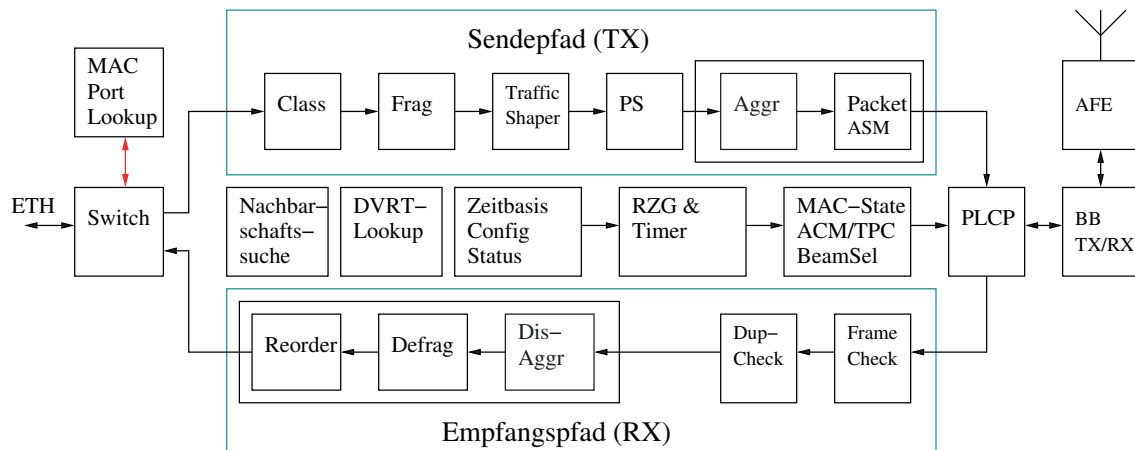


Abbildung 5.2: Übersicht der Komponenten des Kommunikationssystems

im Hauptfokus des MAC-Protokollentwurfs, da möglichst kurze Latenzen erreicht werden sollen.

Die Betreiber der Netze stellen entsprechende Anforderungen an die Latenzen und den Datendurchsätzen. Die Latenz darf z.B. maximal 10 ms betragen und sollte im Allgemeinen 5 ms nicht überschreiten. Angestrebt werden Latenzen unter 1 ms. Die geforderten Datenraten betragen 150 MBit/s für den Downlink vom Kernnetz zu einer Mobilfunkbasisstation und 50 MBit/s für den Uplink in das Kernnetz (150 : 50). Eine Bündelung dreier Links ermöglicht die dreifachen Datenraten (450 : 150). Die erlaubten Datenraten und die Verkehrsform pro (virtuellem) Datenstrom (siehe Abschnitt 3.1.2 auf Seite 25) wird mittels Service Level Agreement (SLA) vereinbart. Entsprechen die eingespeisten Datenraten nicht dem SLA, kann der Datenstrom mit Hilfe eines Traffic-Shapers angepaßt werden, d.h. Überschreitungen der vereinbarten Datenraten (Bursts) führen zum Verwerfen von Datenpaketen. Weiterhin ist QoS mit Weighted Fair Queuing (WFQ) und zusätzliches Monitoring von Performanzparametern wie Delay, Jitter, Packet Loss Rate (PLR) und PER bereitzustellen.

## 5.2. Komponenten des Kommunikationssystems

Abbildung 5.2 zeigt eine Übersicht der Komponenten des vorgeschlagenen Kommunikationssystems. Die Verbindung zu Datenquellen und -senken erfolgt über eine Standard-Ethernet-Verbindung. Werden mehrere Ethernet-Ports unterstützt, so sorgt ein Paket-Switch für die entsprechende Paketweiterleitung. Die *MAC-Port-Lookup*-Komponente sammelt dazu die Zuordnungen der Portnummern zu den MAC-Adressen (siehe Abschnitt 7.4.1 auf Seite 120). Die Unterstützung der Dienstgüte durch Traffic-Shaping, Admission Control und Paketplanung (Scheduler) wird der Datensicherungsschicht zugeordnet, da die CoS-Information des VLAN-Tags genutzt werden. Die Aktualisierung der Routingtabelle und die Nachbarschaftssuche werden über die Steuereinheit gesteuert. Beide Funktionen sind Teil der Vermittlungsschicht und werden im Folgenden genauer vorgestellt.

## 5.3. Funktionen der Vermittlungsschicht

In Multi-Hop-Szenarien müssen die Pakete möglichst auf dem kürzesten bzw. schnellsten Weg ihr Ziel erreichen. Dazu müssen die Nachbarschaftsbeziehungen der Stationen bekannt sein. Nach der Platzierung einer Station muß diese durch die anderen gefun-

Tabelle 5.1: Übersicht von Publikationen verfügbarer 60-GHz-Demonstratoren und kommerzieller Angebote (nicht bekannt "-")

Quelle	Modulation	BW [GHz]	Modulation Coderate	Datenrate [Gbit/s]	FEC	Range [m]	MAC	Duplex- verfahren	Technologie	Antenne
[2]	OFDM	2,16	QPSK- $1/2$	1,3	CC	19	Polling/TDMA	Halb	SiGe+FPGA	Vivaldi/ $2 \times 2$ Patch
[5]	OFDM	0,333	QPSK- $1/2$	0,24	CC	3	Polling/TDMA	Halb	SiGe+FPGA	Cavity
[59]	SC	-	DQPSK	2	BCH/RS	-	-	Simplex	SiGe+FPGA	„folded“ Chip
[60]	OFDM	2,16	16QAM	<4	CC/RS	-	WiHD [40]	Halb	90nm CMOS	Array
[61]	SC	2	DBPSK	0,804	RS	10	-	Voll	PECL	Horn
[64]	SC	10	BPSK	6	-	2	-	Halb	65nm CMOS	Horn
[62]	SC	2,2	ASK	1,25	RS	1400	-	Voll	multi-chip	Parabol
[63]	OFDM	1,2	16QAM	3	CC	2	TDMA	Halb	65nm+FPGA	8×Horn
[65]	SC	7	OOK	1,5	-	0,38	-	Simplex	90nm CMOS	$4 \times 3$ Patch
[66]	-	-	-	1,25	-	<1,6	Schicht 1	Voll	-	Parabol
[67]	SC	0,5	8-PSK	1	-	<800	-	Voll	FPGA	Patch
[68]			64-QAM	1 (asymm)	-	<500	-	Voll (TDD)	-	Patch
[69]	1/Q	2,16		1,25	-	<500	-	Voll	-	Horn (Waveguide)
[70]			QPSK	1	RS	<800	-	Voll	-	Patch

den werden. Die Nachbarschaftssuche führt diese initiale Suche mit Hilfe der elektronisch verstellbaren Richtantennen durch. Sind alle Verbindungsmöglichkeiten bekannt, wird ein Medienzugriffsschema ermittelt, das allen Stationen störungsfreien Zugriff auf das Medium ermöglicht. Diese Zugriffsplanung kann statisch vorgegeben oder dynamisch zur Laufzeit erzeugt werden. Darauf aufbauend werden entsprechend die Routingtabellen erzeugt.

### 5.3.1. Steuerung der Abstrahlcharakteristik gerichteter Antennen

Die Abstrahlcharakteristik einer Antenne kann durch Beamforming-Techniken beeinflusst werden. Dabei kann nur die Form oder zusätzlich die Richtung des Strahls (Beamsteering) bestimmt werden. Eine mechanische Änderung der Richtung verhindert schnelle Umschaltzeiten und erhöht somit die Latenzen beim Wechsel einer Verbindung. Für diese Arbeit wird vorausgesetzt, dass der stark gebündelte Antennenstrahl in die entsprechende Richtung gelenkt werden kann. Das erfolgt vollelektronisch über sogenannte Vektormodulatoren (VM). Die Vektormodulatoren verändern das Sendesignal in der Phase und/oder der Amplitude. Durch Überlagerung der modifiziert abgestrahlten Wellen ändert sich die Form und somit auch die Antennenabstrahlcharakteristik. Die Anzahl der Patchelemente bestimmt den möglichen Antennengewinn und die Qualität des geformten Strahls.

Jeder Vektormodulator benötigt mehrere Parameter zur Konfiguration. Diese werden über eine serielle Programmierschnittstelle (SPI<sup>76</sup>) in den Registerbereich des VM-ICs geschrieben. Im Folgenden soll ein VM-IC acht Vektormodulatoren enthalten. Der Parametersatz für eine komplette Programmierung aller VMs einer Antenne wird Strahlkonfiguration genannt. Die Programmierschnittstelle stellt außerdem mehrere Registerbereiche für die Speicherung mehrerer Strahlkonfigurationen zur Verfügung, wobei der aktive über einen 1-aus-N-Multiplexer direkt ausgewählt wird (Schnellauswahl/fast-select=FS).

Ist die Strahlkonfiguration in den Registerbereichen nicht verfügbar, muß sie komplett eingeschrieben werden. Das initiale Programmieren eines Registerbereiches verursacht eine zusätzliche Verzögerung, falls sofort mit dieser Strahlkonfiguration gesendet werden soll. Nach dem Programmieren bzw. der Schnellauswahl muß die Einschwingzeit abgewartet werden. Während der Benutzung einer Strahlkonfiguration kann eine andere in einen anderen Registerbereich im Hintergrund neu programmiert werden. Dann ist nur die Einschwingzeit nach der Schnellauswahl zu beachten.

Algorithmus 1 und 2 auf Seite 70 zeigen den Ablauf für das Senden (TX) und das Empfangen (RX) eines PHY-Frames mit einer Einstellung der Strahlkonfiguration. Die SPI- und VM-Basisparameter für die anschließenden Berechnungen sind in Tabelle 5.2 dargestellt. Die SPI-Programmierungsdauer für eine Strahlkonfiguration mit acht Vektormodulatoren wird nach Formel (33) berechnet. Weitere Zeiten für unterschiedliche SPI-Parameter sind in Tabelle 5.3 aufgeführt, wobei  $N_{SPI}$  die Anzahl der zu programmierenden VM-ICs und  $N_{MOSI}$  die Datenbitbreite kennzeichnet.

$$T_{BP\_SPI\_conf} = \frac{N_{SPI}}{N_{SPI\_PAR}} \times \frac{N_{BP\_Regs}}{4} \times \frac{N_{SPI\_width\_4}}{N_{MOSI}} \times T_{SPI\_CLK} \quad (33)$$

---

<sup>76</sup>SPI - Serial Programming Interface

Tabelle 5.2: SPI- und VM-Basisparameter

Anzahl Registerbereiche für Schnellauswahl	$N_{FS} = 8$
Register per VM	$N_{Regs\_per\_VM} = 6$
Anzahl VMs per IC	$N_{VM} = 8$
SPI-Register pro BP	$N_{BP\_Regs} = N_{VM} \times N_{Regs\_per\_VM} = 48$
SPI-Wortlänge für 1 Byte-Zugriff	$N_{SPI\_width\_1} = 24$
SPI-Wortlänge für 4 Byte-Zugriff	$N_{SPI\_width\_4} = 48$
Anzahl der SPI-Slaves	$N_{SPI} = 1 \dots n$
SPI-Parallelisierung	$N_{SPI\_PAR} = 1 \dots n$
SPI-Datenbit-Parallelisierung	$N_{MOSI} = 1 \dots m$
SPI-Taktfrequenz	$f_{SPI\_CLK} = 50\text{ MHz}$ $T_{SPI\_CLK} = 20\text{ ns}$

Tabelle 5.3: SPI-Konfigurationszeiten für  $N_{VM} = 8$ 

$N_{SPI}$	$N_{SPI\_PAR}$	$N_{MOSI}$	$T_{BP\_SPI\_conf} [\mu s]$
1	1	1	11,52
1	1	2	5,75
1	1	4	2,88
4	1	1	46,08
4	2	1	23,04
4	4	1	11,52

Die Programmierung hat einen Einfluss und das Zeitverhalten im 60-GHz-Datenkommunikationssystem (siehe Abschnitt 4.3.2 auf Seite 57) und ergibt sich aus den folgenden Berechnungen. Die Dauer für den Strahlkonfigurationswechsel ohne und mit SPI-Konfiguration wird nach den Formeln (34) und (35) berechnet. Die Steuerung erfolgt durch den MAC und verursacht eine zusätzliche Latenz von  $100\text{ ns}$  jeweils für  $T_{RX\_Mute}$  und  $T_{Fast\_Select}$ . Die Einschwingzeit der Strahlkonfiguration wird mit  $T_{BP\_setup} \leq 500\text{ ns}$  angegeben.

$$T_{BP\_FS} = T_{RX\_Mute} + T_{Fast\_Select} + T_{BP\_setup} = 0,700\text{ }\mu s \quad (34)$$

$$T_{BP\_CFG} = T_{BP\_SPI\_conf} = 11,520\text{ }\mu s \quad (35)$$

$$T_{BP\_CFG\_FS} = T_{BP\_CFG} + T_{BP\_FS} = 12,220\text{ }\mu s \quad (36)$$

### 5.3.2. Nachbarschaftssuche

Bevor eine Datenübertragung über gerichtete Verbindungen stattfinden kann, müssen die Antennenabstrahlcharakteristiken des Senders und des Empfängers aufeinander abgestimmt sein. Dazu ist jeweils die passende Strahlkonfiguration im Sender und im Empfänger einzustellen. Diese hängt von der Positionierung der Station im Raum und der Installationsausrichtung der Antennen abhängig vom Schwenkbereich des Antennenstrahls ab. Die passenden Strahlkonfigurationen müssen bei der Inbetriebnahme des Netzes vorgegeben bzw. automatisch bestimmt werden. Das nachfolgend vorgestellte Verfahren unterstützt die Suche von Teilnehmern sogar, wenn die Entfernung unbekannt ist. Bei großen Entfernungen und kleinen Öffnungswinkeln bzw. hoher Strahlbündelung ist eine erschöpfende Suche über alle möglichen Strahlkonfigurationen notwendig. Die Kommunikation

---

**Algorithmus 1** Senden eines Pakets mit Einstellung der Strahlkonfiguration  $BP_{TX}$

---

- aktiviere RX-Mute ( $T_{RX\_Mute}$ )
  - Falls Strahlkonfiguration programmiert werden muß (Schnellauswahl nicht möglich)?
    - konfiguriere Registerbereich via SPI ( $T_{BP\_CFG}$ )
  - Schnellauswahl des Registerbereiches ( $T_{BP\_FS}$ )
  - Warte bis Position stabil ( $T_{BP\_setup}$ )
  - Sende TX-Frame an BB (Parameter + Paketdaten)
  - Warte bis Übertragung beendet
  - Deaktiviere RX-Mute ( $T_{RX\_Mute}$ )
- 

---

**Algorithmus 2** Empfangen eines Pakets mit Einstellung der Strahlkonfiguration  $BP_{RX}$

---

- aktiviere RX-Mute
  - Falls Strahlkonfiguration programmiert werden muß (Schnellauswahl nicht möglich)?
    - konfiguriere Registerbereich via SPI
  - Schnellauswahl des Registerbereiches
  - Warte bis Position stabil
  - Deaktiviere RX-Mute
  - Warte bis Empfang von Daten oder Abbruch durch MAC
-

zwischen den Endgeräten sowie die Anzahl und die Einstelldauer der Strahlkonfigurationen bestimmen den Aufwand und die Dauer der Suche. Das vorgestellte Verfahren zur Antennenausrichtung wurde durch den Autor dieser Arbeit als Patent mit angemeldet (*DE-Patentanmeldung 102013218862.5*).

Die Suche wird durch eine Station, den Master, koordiniert. Eine zu einem bestehenden System hinzuzufügende Station ist immer ein Slave. Der Suchalgorithmus erfordert eine Basiskommunikation. Dazu wird ein PHY-Frame bestehend aus einer Präambel, einem PHY-Header und ggf. einem Datensymbol genutzt. Die entsprechenden Latenzen für das *EASY-A*-System sind in Tabelle 4.1 auf Seite 58 aufgeführt.  $T_{DEC\_DATA}$  und  $T_{DEC\_PH}$  werden jeweils um eine Mikrosekunde erhöht, um die Übertragungslatenzen der PLCP-Schnittstelle (siehe Abschnitt 7.4.5 auf Seite 136) zu berücksichtigen.

### 5.3.2.1. Das 2-phasige Verfahren zur Antennenausrichtung

Die Antennenausrichtung erfolgt in zwei Phasen: eine langsame und eine schnelle Phase. Die Ausführung der initialen langsamen Phase erfolgt unsynchronisiert. Die zweite schnelle synchronisierte Phase wird durch den Master koordiniert. Die Ausführungsdauer ist abhängig von der Anzahl der Strahlkonfigurationen und der Übertragungsdauer eines PHY-Frames. Die Übertragungsdauer mit einem Datensymbol ist  $T_{PF} = 5,1 \mu s$ . Nach der Zeit  $T_{DEC\_DATA} = 17 \mu s$  sind die Daten dekodiert. Sollte nur der PHY-Header zur Datenübertragung genutzt werden, sind die Daten bereits nach  $T_{DEC\_PH} = 14 \mu s$  verfügbar.

**Die unsynchronisierte Phase 1** Die initiale Phase wird nach dem Einschalten eines unkonfigurierten Gerätes bzw. nach einem expliziten Aufruf gestartet. Der Master testet iterativ und wiederholend alle Strahlkonfigurationen, bis eine Kommunikation mit einem hinzugefügten Slave möglich ist. Dazu sendet der Master ein Hallo-Paket und wartet bis eine Antwort eintrifft oder eine vordefinierte Zeit abgelaufen ist. Nach einer Zeitüberschreitung wird mit der nächsten Strahlkonfiguration fortgefahren. Eine erfolgreich dekodierte Antwort leitet *Phase 2* ein. Der Slave bleibt für genau solange in einer Strahlkonfiguration, wie der Master für einen Durchlauf aller Strahlkonfigurationen benötigt. Danach wechselt der Slave auf die nächste.

Ein Polling-Zyklus (Anfrage/Antwort) benötigt zwei Kommunikationszeiten plus Schutzzeit, wobei die Schutzzeit u.a. die maximale Signallaufzeit enthält (37).

$$T_{POLL} = 2 \times ([T_{DEC\_DATA}|T_{DEC\_PH}] + T_{GT}) \quad (37)$$

Für eine Entfernung von maximal 1 km muß eine Schutzzeit von mindestens 3  $\mu s$  pro Strecke eingeplant werden ( $T_{GT} > 3,3 \mu s$ ).  $N_{BP}$  bezeichnet die Anzahl der möglichen Strahlkonfigurationen. Für die erste Kommunikation muß für die Dauer  $T_{BP\_CFG\_FS}$  auf das Konfigurieren und für  $T_{BP\_FS}$  auf das Einstellen der Strahlkonfiguration gewartet werden. Danach kann die Zeit für das Konfigurieren eines Registerbereiches vernachlässigt werden, sofern diese kleiner als  $T_{POLL}$  ist.

Im Folgenden wird die Zeit  $T_{BP\_Round1}$  für das Verbleiben des Slaves in einer Strahlkonfiguration berechnet. Die Dauer eines Gesamtzyklus über alle Strahlkonfigurationen  $N_{BP}$  beträgt  $T_{srch1\_NBP}$ . Für die Kommunikation wird das erste Datensymbol genutzt.

$$T_{BP\_Round1} = T_{BP\_CFG\_FS} + N_{BP} \times [T_{BP\_FS} + 2 \times (T_{DEC\_DATA} + T_{GT})] \quad (38)$$

$$T_{srch1\_NBP} = N_{BP} \times T_{BP\_Round1} \quad (39)$$

## 5. Hardwareimplementierbares MAC-Protokoll für drahtlose Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung

Für  $N_{BP} = 1000$  ergibt sich:

$$\begin{aligned} T_{BP\_Round1}(1000) &= 12,220 \mu s + 1000 \times [0,700 \mu s + 2 \times (17 \mu s + 3,3 \mu s)] \\ &= 12,220 \mu s + 41300 \mu s \end{aligned} \quad (40)$$

$$T_{srch1}(1000) = 1000 \times 41,312 ms = 41312 ms \quad (41)$$

Die ausschließliche Nutzung des PHY-Headers für die Kommunikation verringert die Dauer der Suche um 6 s.

Bei einer maximalen Toleranz von 20 ppm pro Quartz akkumuliert sich die Takt drift auf maximal  $40 \mu s/s \times 42 s = 1680 \mu s$ . Das sind  $1,68 \mu s$  pro Strahlkonfiguration (Slave), die zusätzlich über  $T_{GT}$  kompensiert werden.

Die Ausführungszeit der unsynchronisierten Phase  $T_{srch1}$  beschreibt die maximale Dauer einer Suche bei 1000 möglichen Strahlkonfigurationen. Kommt vorher jedoch eine Kommunikation zustande, wechselt der Suchalgorithmus in die zweite Phase.

**Die synchronisierte Phase 2** Die Phase 2 ermöglicht eine durch den Master koordinierte Suche, die die Ausführungszeit zusätzlich reduziert. Dazu wird nach dem Ende der Phase 1 ein Steuerkanal (aktuelle Strahlkonfiguration) vereinbart, über den Kommandos und Ergebnisse ausgetauscht werden.

Der Slave wechselt nach dem Phasenübergang auf den Steuerkanal<sup>77</sup> und wartet auf Steuerpakete. Diese legen z.B. die folgende (Such-)Strahlkonfiguration des Slaves und die Verweildauer fest. Nach dem Wechsel auf die geforderte Strahlkonfiguration speichert der Slave die Informationen der empfangenen Pakete vom Master. Dazu sendet der Master für alle Strahlkonfigurationen nur die Anfrage, d.h. die (Warte-)Zeit für die Antwortphase entfällt. Der Abstand zwischen dem Wechsel der Strahlkonfigurationen des Masters hängt von der Dauer der Dekodierzeit  $T_{DEC\_DATA}$  einer Anfrage und der Konfigurationszeit  $T_{BP\_CFG\_FS}$  der nächsten Strahlkonfiguration ab. Hierbei muß das Maximum beider Zeiten plus eine Sicherheitszeit einkalkuliert werden. Weiterhin besteht im benutzten Basisbandprozessor die Beschränkung, dass der Abstand der Präambeln mindestens  $T_{SFdec} = 13 \mu s$  betragen muß.

Nach dem Ablauf der Verweilzeit wechselt der Slave wieder auf den Steuerkanal und wartet auf weitere Kommandos z.B. für die Übermittlung der empfangenen Pakete. Wenn nur ein Bit pro erfolgreicher Strahlkonfiguration gespeichert wird, werden zwei Datensymbole bei einer QPSK-Modulation ( $N_{sym} = 96$ ) benötigt. Bei 8 Bit pro Strahlkonfiguration müssen 11 Datensymbole übertragen werden. Eine höhere Bitanzahl kann z.B. für die Übermittlung der Empfangsleistung notwendig sein. Die maximale Ausführungszeit  $T_{srch2}$  der zweiten Phase wird nach (42) und (43) bestimmt.

$$\begin{aligned} T_{BP\_Round2} &= T_{BP\_CFG\_FS} + T_{BP\_FS} + 2 \times (T_{DEC\_DATA} + T_{GT}) \\ &\quad + N_{BP} \times [T_{BP\_FS} + \max(T_{BP\_CFG\_FS}, T_{DEC\_DATA})] + T_{GT} \\ &\quad + T_{BP\_FS} + 2 \times (T_{DEC\_DATA} + T_{GT}) + \lceil N_{BP}/8/N_{sym} \rceil \times T_{sym} \end{aligned} \quad (42)$$

$$T_{srch2\_N_{BP}} = N_{BP} \times T_{BP\_Round2} \quad (43)$$

Für  $N_{BP} = 1000$  ergibt sich:

$$T_{BP\_Round2}(1000) = 53,52 \mu s + 17703,3 \mu s + 47,823 \mu s = 17804,64 \mu s \quad (44)$$

$$T_{srch2}(1000) = 1000 \times 17805 \mu s = 17805 ms \quad (45)$$

<sup>77</sup>Welcher in diesem Fall die Strahlkonfiguration mit einer erstmaligen erfolgreichen Kommunikation ist.



**Ausführungszeiten** Die ausschließliche Nutzung des PHY-Headers für die Kommunikation verringert die Dauer der Suche. Die Anzahl der Strahlkonfigurationen  $N_{BP}$  wirkt sich quadratisch auf die Ausführungszeit aus, d.h. vergrößert sich die Kommunikationszeit um  $1\ \mu s$ , so vergrößert sich die Ausführungszeit des Algorithmus um  $1\ \mu s \times (N_{BP})^2$ .

Die o.g. Berechnungen beinhalten keine Fehlerbetrachtungen. So kann bei einer Zeitüberschreitung wieder von *Phase 2* auf *Phase 1* gewechselt werden. Jeder Versuch zur Regulierung der Sendeleistung (TPC<sup>78</sup>) erweitert den Verbleib um die Dauer eines Abfragezyklus in derselben Strahlkonfiguration. Ein Phasenwechsel vergrößert die Ausführungszeit im schlechtesten Fall auf die der *Phase 1*. Ein limitierendes Element in *Phase 2* ist u.a. die Konfiguration der (nächsten) Strahlkonfiguration über SPI. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass der Übertragungskanal für die gesamte Suchzeit exklusiv zur Verfügung steht. Der Tabellensatz 5.4 auf der nächsten Seite stellt die maximalen Ausführungszeiten beider Phasen für eine unterschiedliche Anzahl von Strahlkonfigurationen dar. Die Tabellen sind zusätzlich nach der Dauer der Dekodierung der Kommunikationspakete  $T_{DEC\_DATA}$  und  $T_{DEC\_PH}$  aufgeteilt.

Der Start des Suchalgorithmus beider Geräte wird als nicht synchron angenommen. Nach dem Übergang in die *Phase 2* werden die verbleibenden Strahlkonfigurationen aus den Laufzeiten des Suchalgorithmus im Master und im Slave errechnet, um eine Überschneidung zu vermeiden.

Der beste Fall tritt ein, wenn in der ersten Phase die erste(n) Strahlkonfiguration(en) für eine Kommunikation benutzt werden können und so schnell wie möglich in *Phase 2* übergegangen werden kann. Wenn die Geräte in entsprechender Richtung und Höhe aufeinander ausgerichtet werden und der Suchalgorithmus auf beiden Seiten gleichzeitig gestartet wird, kann angenommen werden, dass sich die Geräte, bei einer konzentrischen Suchabfolge von innen nach außen (und nicht zeilenweise von oben nach unten), mit hoher Wahrscheinlichkeit in einer sehr frühen Ausführungsphase finden. Dazu muß der Algorithmus nicht geändert werden, sondern nur die Reihenfolge der Auswahl der Strahlkonfigurationen. Abhängig von der Startzeit der Algorithmen und der Installation (Höhe/Ausrichtung) der Geräte kann die Optimierung aber unwirksam werden, falls die Geräte *ungünstig* ausgerichtet wurden. Sollen mehrere Geräte gleichzeitig gefunden werden, kann *Phase 2* nicht genutzt werden, da die Strahlkonfigurationen des Kontrollkanals nicht für alle Stationen übereinstimmen.

#### 5.3.2.2. Nachbarschaftssuche während des laufenden MAC-Protokolls

Die Suche nach einem neuen Teilnehmer kann abhängig vom Medienzugriffsprotokoll auch im laufenden Betrieb erfolgen. Das hat den Vorteil, dass die Datenübertragung nicht unterbrochen werden muß und so die Verfügbarkeit nicht beeinträchtigt wird. Das entworfene MAC-Protokoll wird in Abschnitt 5.4.8 auf Seite 83 erläutert. Kurz zusammengefaßt wird der Zugriff der Teilnehmer in Zeitabschnitte (Slots) organisiert: ein Beacon-Slot gefolgt von einem Beacon-Suchslot und bis zu acht Datenslots. Diese Struktur wird als Rahmen (Superframe) bezeichnet und wiederholt sich periodisch. Als Ergebnis der Nachbarschaftssuche wird der Zugriff der Teilnehmer in den Datenslots festgelegt.

Im laufenden Betrieb dauert das Hinzufügen eines neuen Terminals länger, da nur die freie Übertragungszeit für die Nachbarschaftssuche genutzt werden kann. Zur Berechnung der Zykluszeit je Strahlkonfiguration im Slave müssen die Parameter des laufenden MAC-Protokolls bekannt sein. Kann in jedem Rahmen eine Strahlkonfiguration getestet werden, so dauert die Nachbarschaftssuche bei einer Rahmendauer von 1 ms und 1000 möglichen

<sup>78</sup>TPC - Transmit Power Control

Tabelle 5.4: Maximale Ausführungszeiten für den Strahlsuchalgorithmus in *Phase 1* & *2*

$N_{BP}$	$T_{BP\_Round1}$	$T_{srch1}$	$N_{BP}$	$T_{BP\_Round1}$	$T_{srch1}$
	[ms]	[mm : ss]		[ms]	[mm : ss]
1000	41,312	0:42	1000	35,312	0:36
2000	82,612	2:46	2000	70,612	2:22
4000	165,212	11:01	4000	141,212	9:25
8000	330,412	44:03	8000	282,412	37:46

 (a) Phase 1:  $T_{DEC\_DATA} = 17 \mu s$ 

 (b) Phase 1:  $T_{DEC\_DATA} = 14 \mu s$ 

$N_{BP}$	$T_{BP\_Round2}$	$T_{srch2}$	$N_{BP}$	$T_{BP\_Round2}$	$T_{srch2}$
	[ms]	[mm : ss]		[ms]	[mm : ss]
1000	17,804	0:18	1000	14,792	0:15
2000	35,510	1:12	2000	29,573	1:00
4000	70,923	4:44	4000	58,911	3:56
8000	141,748	18:54	8000	117,736	15:42

 (c) Phase 2:  $T_{DEC\_DATA} = 17 \mu s$ 

 (d) Phase 2:  $T_{DEC\_PH} = 14 \mu s$ 

Strahlkonfigurationen ca. 17 min. Sind mehrere Datenslots im Rahmen konfiguriert, aber nicht genutzt, können diese Zeitabschnitte mit der Dauer  $T_{SLOT}$  zur Suche genutzt werden (siehe Formel 50 auf Seite 85). Zusätzlich kann auch noch der Zeitabschnitt des Beacon-Suchslots  $T_{Beacon\_Srch}$  genutzt werden. Es können also höchstens  $N_{BP\_BSLOT} + N_{SLOT} \times N_{BP\_SLOT}$  Strahlkonfigurationen pro Rahmendauer  $T_{Beacon\_Period}$  getestet werden. Die maximale Anzahl der Suchanfragen im Beacon-Suchslot wird mit (46) bestimmt. Die maximale Anzahl der möglichen Anfragen pro Datenslot wird mit (47) oder (48) berechnet. Je nachdem, ob ein PHY-Frame mit einem Datensymbol oder nur der PHY-Header für die Kommunikation benutzt wird. Die benötigte Zeit für die Nachbarschaftssuche wird mit (49) bestimmt. Zusätzlich muß die Strahlkonfiguration auch innerhalb eines Datenslots gewechselt werden. Die Tabellen 5.6a und 5.6b auf der nächsten Seite zeigen die Ausführungszeiten für unterschiedliche  $N_{BP}$  mit  $T_{Beacon\_Period} = 1000 \mu s$ ,  $T_{Beacon} = 50 \mu s$ ,  $T_{Beacon\_Srch} = 50 \mu s$  und  $T_{SLOT} = 112,5 \mu s$ . So kann die Suche mit einem Test in  $T_{Beacon\_Srch}$  und zwei Tests in einem Datenslot innerhalb von ca. 5 min abgeschlossen werden. Die ersten drei Einträge beider Tabellen zeigen jeweils die Zeiten für einen Test pro Beacon-Suchslot. Die Zeitdauer für das Verbleiben in einer Strahlkonfiguration im Slave muß entsprechend der Anzahl der Tests pro Rahmen und der Dauer des Rahmens angepaßt werden.

$$N_{BP\_BSLOT} = \left\lfloor \frac{T_{Beacon\_srch}}{T_{BP\_FS} + 2 \times (T_{DEC\_DATA} + T_{GT})} \right\rfloor = 2 \quad (46)$$

$$N_{BP\_SLOT\_DATA} = \left\lfloor \frac{T_{SLOT}}{T_{BP\_FS} + 2 \times (T_{DEC\_DATA} + T_{GT})} \right\rfloor = 2 \quad (47)$$

$$N_{BP\_SLOT\_PH} = \left\lfloor \frac{T_{SLOT}}{T_{BP\_FS} + 2 \times (T_{DEC\_PH} + T_{GT})} \right\rfloor = 3 \quad (48)$$

$$T_{Fsrch\_N_{BP}} = \frac{(N_{BP})^2 \times T_{Beacon\_Period}}{N_{BP\_BSLOT} + N_{SLOT} \times N_{BP\_SLOT\_ [DATA|PH]}} \quad (49)$$

Tabelle 5.5: Maximale Ausführungszeiten der Suche einer neuen Station bei laufendem MAC-Protokoll

$N_{BP}$	$N_{BSLOT}$	$N_{SLOT}$	$T_{Fsrch}$ [mm : ss]
128	0	$1/2$	0:17
256	0	$1/2$	1:06
512	0	$1/2$	4:23
1000	0	1	8:20
	1	1	5:34
	2	1	4:10
	2	8	0:56
2000	2	8	3:43
4000	2	8	15:49
8000	0	1	553:20
	2	1	266:40
	2	8	59:16

$N_{BP}$	$N_{BSLOT}$	$N_{SLOT}$	$T_{srch}$ [mm : ss]
128	0	$1/3$	0:17
256	0	$1/3$	1:06
512	0	$1/3$	4:23
1000	0	1	5:34
	1	1	4:17
	2	1	3:20
	2	8	0:39
2000	2	8	2:34
4000	2	8	10:16
8000	0	1	355:34
	2	1	213:20
	2	8	41:01

(a)  $T_{DEC\_DATA} = 17 \mu s$ ,  $N_{BP\_SLOT\_DATA} = 2$ (b)  $T_{DEC\_SF} = 14 \mu s$ ,  $N_{BP\_SLOT\_PH} = 3$ 

### 5.3.3. Slotbasierte Strahlkonfigurationsvorschrift

Die Zuordnung der Verbindungen zwischen den Teilnehmern innerhalb der Slots erfolgt mit der Strahlkonfigurationsvorschrift. Diese kann nach dem Finden eines neuen Teilnehmers dynamisch aktualisiert oder für ein komplettes System vorkonfiguriert werden. Die erste Variante eignet sich für Ad-Hoc-Netze. Die zweite kann beim Hinzufügen einer Station in Festinstallationen genutzt werden. Das Ergebnis der neu berechneten Zugriffsvorschrift muß anschließend in die betroffenen Stationen übertragen werden. Die Zugriffsvorschrift für die Teilnehmer wird in zwei zweidimensionalen Matrizen verwaltet. Diese sind in der Hardware einfach im Speicher abzubilden und bestehen aus sovielen Zeilen wie die Anzahl der Knoten im System und aus sovielen Spalten wie die Anzahl der Datenslots. Die Anzahl der Nachbarstationen wird für das vorgestellte Beispiel auf acht konfiguriert, um die Hardwareressourcen für die Verwaltungsstrukturen zu begrenzen (siehe Abschnitt 7.4).

Für den Normalbetrieb sind die Slotbelegungsmatrix (SBM) und die Master-Slave-Rollenverteilungsmatrix (MSRM) zuständig. Ist die Kommunikation über redundante Verbindungen möglich, so werden diese z.B. bei einer Blockierung über die alternativen SBM und MSRM durch den Master aktiviert. Für jede mögliche Wegalternative wird eine separate SBM und MSRM vorberechnet und in den entsprechenden Stationen gespeichert. Für die Speicherung der Konfiguration ist jeweils nur der Zeileneintrag der jeweiligen Knotenadresse der entsprechenden Tabellen notwendig.

**Slotbelegungsmatrix (SBM)** Die *Slotbelegungsmatrix* speichert die Strahlkonfigurationen für alle Knoten in den jeweiligen Datenslots. Die Zeilen stehen für die Knotennummer aller Stationen. Die Spalte kennzeichnet den Datenslot und enthält den Nachbarknoten mit dem im Slot kommuniziert wird.

**Master-Slave-Rollenverteilungsmatrix (MSRM)** Im eingesetzten Polling-Verfahren startet der Master die Kommunikation. Der Multi-Hop-Master ist immer der, der die kürzeste Route zum Master hat. Die *Master-Slave-Rollenverteilungsmatrix* speichert die Rollenverteilung der Knoten für alle Zeitschlitze. Der Test der alternativen Verbindungen hat keinen Einfluss auf die Synchronisierung der Slave-Stationen. Deshalb wird diese Slave-Rolle besonders markiert, so dass keine Synchronisierungsinformationen übernommen werden.

#### 5.3.3.1. Generierung der Konfigurationsvorschriften

Die Berechnung der Matrizen ist Bestandteil der Simulationsumgebung (siehe Kapitel 6 ab Seite 97). Nach der Erstellung eines Szenarios muß die Verbindungsmatrix spezifiziert werden. Die *Verbindungsmatrix* enthält an den Stellen eine 1, falls zwischen zwei Knoten eine Verbindung besteht. Die Zeilen und Spalten adressieren jeweils die Knoten.

Algorithmus 4 auf Seite 155 beschreibt die Erstellung der Matrizen. Folgende Punkte werden berücksichtigt:

- ausreichende Bandbreiten vom Startknoten zum Endknoten
- spezielle Eigenschaften des Straßenzugszenarios (Daisy-Chain)
- Generierung der zusätzlichen Belegung(en) für den Test der alternativen Verbindungen im Beacon-Slot

Das Punkt-zu-Punkt-Szenario mit zwei Stationen benötigt nur einen Datenslot, da nicht zwischen den Stationen umgeschaltet werden muß. Das Punkt-zu-Mehrpunkt-Szenario benötigt mindestens soviele Datenslots wie die Anzahl der erreichbaren Nachbarstationen. Im Straßenzugszenario (Daisy-Chain) kann jede Station mit maximal zwei Nachbarknoten kommunizieren. Deshalb würden zwei Datenslots ausreichen. Aber: Ein Rahmen besteht jeweils aus dem Beacon-Slot, dem Beacon-Suchslot und den Datenslots (siehe Abschnitt 5.4.8). Je weniger Datenslots benötigt werden und je kleiner die Rahmendauer, desto größer ist der Anteil des Beacon-Slots und des Beacon-Suchslots. Die Dauer eines Datenslots sollte aber nicht zu groß sein, damit geringe Übertragungslatenzen vom Start- zum Endknoten erreichbar sind. Deshalb wird für das Straßenzugszenario ein Vielfaches der Datenslots entsprechend der Anzahl der erreichbaren Nachbarstationen benutzt.

Im Folgenden werden einige wichtige Szenarien mit den dazugehörigen Verbindungs- und Slotbelegungsmatrizen vorgestellt.

#### 5.3.3.2. Single-Hop-Szenario mit Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen

Das Szenario entspricht Abbildung 5.4a auf Seite 87. Die Verbindungsmatrix und die dazugehörige Standardslotbelegungsmatrix für das Single-Hop-Szenario ist in Tabelle 5.6 dargestellt.

#### 5.3.3.3. Multi-Hop-Szenario: Straßenzug (Daisy-Chain)

Die Verbindungsmatrix und Slotbelegungsmatrix für das Straßenzugszenario (Daisy-Chain) nach Abbildung 5.4c auf Seite 87 ist in Tabelle 5.7 dargestellt.

Tabelle 5.6: Verbindungs- und Slotbelegungsmatrix für das Punkt-zu-Mehrpunkt-Szenario

<u>Node</u> <u>Node</u>	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	-	X	X	X	X	X	X	X	X
1		-							
2			-						
3				-					
4					-				
5						-			
6							-		
7								-	
8									-

(a) Verbindungsmatrix

<u>Slot</u> <u>Node</u>	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(b) Standardslotbelegungsmatrix

(a) Verbindungsmatrix

(b) Standardslotbelegungsmatrix

Tabelle 5.7: Verbindungs- und Slotbelegungsmatrix für das Straßenzugszenario (Daisy-Chain)

<u>Node</u> <u>Node</u>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	<u>Slot</u> <u>Node</u>	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	-	X								0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1		-	X							1	0	2	0	2	0	2	0	2	2
2			-	X						2	3	1	3	1	3	1	3	1	1
3				-	X					3	2	4	2	4	2	4	2	4	4
4					-	X				4	5	3	5	3	5	3	5	3	3
5						-	X			5	4	6	4	6	4	6	4	6	6
6							-	X		6	7	5	7	5	7	5	7	5	5
7								-	X	7	6	8	6	8	6	8	6	8	8
8									-	8	7	7	7	7	7	7	7	7	7

(a) Verbindungsmatrix

(b) Standardslotbelegungsmatrix

#### 5.3.3.4. Multi-Hop-Szenario: komplex

Die Verbindungsmatrix und Slotbelegungsmatrix ohne Verbindungsblockierung nach Abbildung 5.4b zeigt Tabelle 5.8. Im Fall ohne Verbindungsblockierungen werden die Verbindungen (2-3) & (3-4) nicht für die Kommunikation benötigt. Trotzdem muß der Status überwacht werden, um eine Entscheidung durch den Master treffen zu können. Dazu wird eine Slotbelegung generiert, die einen Beacon-Austausch auch zwischen den alternativen Verbindungen durchführt. Die zusätzlich eingefügten Belegungen sind unterstrichen.

#### 5.3.4. Alternative Strahlkonfigurationsvorschriften bei Verbindungsblockierung

Im Falle eines Verbindungsausfalls muß zunächst der Ausfall selbst detektiert werden. Dazu können der Beacon-Slot als auch der jeweilige Datenslot verwendet werden. Sobald ein Knoten nicht erreichbar ist, d.h. nach mehreren erfolglosen Versuchen, wird eine alternative Slotbelegungsmatrix durch den Master ausgewählt. Die Auswahl/Umschaltung muß gleichzeitig für alle an der Standard- und Alternativverbindung beteiligten Knoten erfolgen. Im laufenden Betrieb wird die Qualität der Verbindung von jedem Knoten periodisch in größeren Abständen an den Master gesendet. Fällt eine Verbindung aus, so

Tabelle 5.8: Verbindungs- und Slotbelegungsmatrix für Szenario aus Abbildung 5.4b

$\frac{Node}{Node}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	$\frac{Slot}{Node}$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	-	X	X	X	X		X			0	6	3	6	1	2	3	4	6
1		-								1	0	0	0	0	0	0	0	0
2			-	X						2	0	0	0	0	0	0	<u>3</u>	0
3				-	X	X				3	<u>4</u>	0	5	5	5	0	<u>2</u>	0
4					-					4	<u>3</u>	0	0	0	0	0	0	0
5						-				5	3	3	3	3	3	3	3	3
6							-	X		6	0	7	0	7	7	7	7	0
7								-	X	7	8	6	8	6	8	6	8	6
8									-	8	7	7	7	7	7	7	7	7

(a) Verbindungsmatrix

(b) Standardslotbelegungsmatrix

wird zusätzlich eine *Alarm*-Nachricht an den Master gesendet. Dieser schickt als Antwort eine *Anweisungs*-Nachricht an alle Knoten, die von dem Verbindungsausfall betroffen sind. Diese enthält die zu benutzende alternative Slotbelegungsmatrix ab einer bestimmten Rahmennummer. Die *Anweisungs*-Nachrichten werden gezielt nur an die betroffenen Knoten gesendet. Nach der Wiederherstellung der ausgefallenen Verbindung erfolgt die Umschaltung auf die Standardslotbelegungsmatrix mit demselben Mechanismus. Die Auswahl der betroffenen Knoten und das Absenden der *Anweisungs*-Nachrichten kann mit Hilfe einer Softwareimplementierung erfolgen. Die Qualitätsmeldung sowie die *Alarm*-Nachricht werden mit dem Info-Block aus Tabelle 5.13 auf Seite 93 übertragen. Dazu werden zwei mal acht Bytes jeweils für die Nachbarknotenadressen und den Status reserviert. Diese Nachricht wird dann direkt an den Master übertragen. Die vom Master gesendete Anweisung zum Umschalten auf eine andere Slotbelegungsmatrix erfolgt auch mit dem Info-Block. Dieser enthält dann die Nummer der Slotkonfiguration und die Startrahmennummer ab der die Konfiguration gültig ist. Die Protokollsteuernachrichten werden am Anfang eines PHY-Frames gesendet und erreichen so im selben oder im nächsten Rahmen den oder die Empfänger. Das gilt auch für die Antwort, so dass als maximale Latenz die Dauer von vier Rahmen angegeben werden kann.

Die alternativen Slotbelegungsmatrizen für verschiedene Blockierungsszenarien des komplexen Szenarios zeigt der Tabellensatz A.4 auf Seite 159 im Anhang.

### 5.3.5. Wegsuche (Routing)

Basierend auf den Slotbelegungsmatrizen aller Knoten werden die entsprechenden Routing-Tabellen mit dem Distance Vector Routing Protokoll (DVRP) errechnet (siehe Abschnitt 3.1). Das gilt auch für die alternativen Belegungen. Diese werden in den jeweiligen Knoten als vorberechnete alternative Routenkonfigurationen vorgehalten, die zusammen mit den Slotbelegungsmatrizen aktiviert werden. Alternativ ist aber auch eine dynamische Aktualisierung möglich. Diese kann über die periodischen Qualitätsmeldungen des MAC-Protokolls erfolgen, wenn die Qualitätsmeldungen zusätzlich an alle Nachbarn versendet werden. Letzteres Verfahren eignet sich z.B. für ein Ad-hoc-Netzwerk.

## 5.4. Funktionen der Datensicherungsschicht

Während sich die Funktionen der Vermittlungsschicht günstiger in Software abbilden lassen, eignen sich die Funktionen der Datensicherungsschicht für eine vollständige Hardwareintegration, um Verarbeitungslatenzen zu reduzieren und den Datendurchsatz zu steigern.

### 5.4.1. Datenflusskontrolle

Die Stationen erhalten ihre Datenpakete über die Ethernet-Ports und die drahtlose Verbindung. Eine Datenflusskontrolle kann z.B. auf der Basis des Füllstandes der Puffer im Sendepfad (Aggr) erfolgen. Im Empfangspfad können die Ausgabepuffer (Defragmentierung und Wiederherstellung der Ausgabereihenfolge) volllaufen. Das geschieht, wenn Pakete im Ausgabepuffer warten müssen, um die Ausgabereihenfolge wiederherzustellen. Weiterzuleitende Pakete im Multi-Hop-Betrieb werden in den Sendepfad eingespeist. Diese wiederum können den Puffer des Sendepfades zum Überlaufen bringen. Eine einfache Möglichkeit wäre, die Pakete nach dem Empfang zu verwerfen, falls sie nicht in einen Puffer geschrieben werden können. Es erfolgt dann auch keine Bestätigung. Die Pakete werden dann bei der nächsten Möglichkeit neu übertragen. Besser ist aber, die Pakete gar nicht erst zu übertragen, wenn der entsprechende Empfangspuffer (Ausgabepuffer bzw. Sendepuffer) voll ist, da in dieser Zeit wiederum Pakete übertragen werden können, deren Zielpuffer frei ist. Also müssen die Pufferzustände der Ausgabe- und der Sendepuffer an alle Nachbarstationen verteilt werden, so dass die Sender nur Pakete schicken, für die entsprechende Pufferkapazitäten vorhanden sind. Müssen Pakete verworfen werden, so ist die Neuübertragung der Pakete innerhalb des MACs eine Fehlerbehandlungsstrategie, die ein Eskalieren des Fehlers (verlorenes Paket) in höhere Schichten verhindern kann.

### 5.4.2. Vergabe von Sequenznummern

Jedes eingehende Paket vom Ethernet-Switch erhält eine fortlaufende Sequenznummer. Diese erlaubt die Einhaltung der Paketreihenfolge bei der Ausgabe in der Zielstation. Wird ein Paket verworfen, weil die maximale Anzahl der Übertragungswiederholungen erreicht ist, entsteht eine Lücke im Ausgabepuffer der Zielstation in der Reihenfolge der Sequenznummern. Das würde die Ausgabe anhalten. Das Problem kann durch zwei Mechanismen gelöst werden. Zum einen kann mit der Festlegung einer maximalen Wartezeit eines Paketes im Ausgabepuffer ein Ausgabestau verhindert werden. Dazu muß die Wartezeit jedes Paketes überwacht werden. Zum anderen wird das gleitende Fenster für die Verwaltung der Ausgabereihenfolge nach dem Eintreffen einer Sequenznummer außerhalb des Fensterbereichs automatisch weitergeschoben, so dass fehlende Sequenznummern aus dem Fenster rausfallen.

Für die Verwaltung im MAC erhalten die Pakete einen zusätzlichen Header, der im Folgenden Aggregationsheader (AH) genannt wird. Dieser beinhaltet die Länge des Ethernet-Paketes (LEN), die Sequenznummer (SEQ), die Fragmentnummer (FGNR), den Class-of-Service-Typ (CoS), die Quelladresse (MSRC), die Zieladresse (MDST), die Knoten-zu-Knoten-Sequenznummer (MSEQ), ein Retry-Flag (RF), einen Time-to-Life-Zähler (TTL), eine Prüfsumme (CRC) und einen Trennmarker (DEL). MSRC, MDST, MSEQ, RF werden vor dem Einstellen des Paketes in den Sendepuffer, die CRC bei der Ausgabe aus dem Paketassembler (*Packet-ASM*) aktualisiert. DEL und CRC dienen dem Finden der AHs aggregierter Pakete, falls ein voriger Frameabschnitt bei der Übertragung zerstört wurde (siehe Abschnitt 5.6). Werden die Paketlängen im MAC-Header gespeichert, so gehen bei einem zerstörten

MAC-Header auch alle aggregierten Datenpakete verloren, da der Anfang nicht rekonstruiert werden kann. Das Delimiter-Verfahren wird auch im IEEE-802.11-Standard eingesetzt.

Im vorgestellten Beispiel ist der Aggregationsheader 12 Bytes lang. Zusätzlich wird am Ende jedes Paketes eine 32-Bit-CRC über den Header und den Daten angehängt. Bei einem 64 Byte-Ethernet-Paket beträgt der Overhead 28%, bei 1518 Bytes 1% und bei 9000 Bytes 0,2%.

### 5.4.3. Duplizierung von Paketen für Broadcast-Anwendungen

Enthalten die Pakete eine Broadcast-Zieldresse, müssen diese Pakete dupliziert werden, um an die Nachbarstationen weiterverteilt werden zu können. Im Ethernet-Switch erfolgt die Duplizierung für alle Ausgangsports. Im MAC werden alle Nachbarstationen mit den Paketen geflutet. Die Pakete dürfen nicht an den Empfangsport des Paketes weitergeleitet werden. Die Duplikaterkennung im Empfangspfad (*Dup-Check*) und das TTL-Feld im Aggregationsheader verhindern, dass Pakete unendlich umherwandern. Die Duplikaterkennung filtert alle bereits empfangenen Pakete mit Hilfe der Felder **MSRC**, **SEQ/FGNR** und **RF** heraus. Der Wert des TTL-Feldes wird mit jedem Hop um eins verringert. Beim Erreichen der Null wird das Paket verworfen. Diese Mechanismen sind notwendig, wenn Pakete ihr Ziel über verschiedene Wege erreichen können (Mesh-Netz).

Die Unterstützung von Multicast-Übertragungen erfordert die Verwaltung einer Tabelle für die Gruppenzugehörigkeit der Teilnehmer. Diese muß allen Stationen bekannt sein. Damit lassen sich die Pakete für alle Stationen einer Gruppe direkt durch das Setzen von MDST adressieren.

### 5.4.4. Fragmentierung von Paketen

Das Zerlegen eines Paketes in kleinere Abschnitte (Fragmentierung) ist notwendig, wenn die Paketlänge ungünstig für die aktuellen Kanalbedingungen (siehe Abschnitt 4.3.1) ist oder wenn die Paketlänge z.B. durch die MAC- oder PHY-Datenverarbeitung (Puffergröße, Dauer eines PHY-Frame) beschränkt ist.

Ein Beispiel: Ein Ethernet-Jumbo-Paket ist z.B. 9000 Bytes groß (Standardpaketgröße: 1518 Bytes). Die maximale PHY-Framelänge lässt maximal 16 KiB an Datenpayload zu. Das Aggregieren zweier Jumbo-Pakete ist nicht möglich, so dass nur ein 9 KiB-Paket mit einem PHY-Frame versendet kann. Das wiederum führt aber zu einer Reduzierung der Effizienz um 7% und des Datendurchsatzes um 94 MBit/s (siehe Abschnitt 4.3). Wird das Paket z.B. in 2048 Byte-Fragmente zerlegt, so entstehen 4\*2048 und 1\*808 Byte-Fragmente. Das gesendete PHY-Frame umfaßt dann alle Fragmente des ersten Jumbo-Paketes und die ersten drei 2048 Byte-Fragmente eines weiteren Paketes. Das PHY-Frame transportiert dann 15144 von 16384 Bytes.

Die Beschränkung der Paketlänge kann auch notwendig sein, wenn die Übertragungsdauer z.B. durch die Dauer der Zugriffsslots bei TDD und TDMA bzw. durch die Rahmen-dauer begrenzt werden. Dann hilft dasselbe Verfahren, um die vorhandene Zeit möglichst effektiv auszunutzen, d.h. der Anteil der ungenutzten Zeit eines Slots kann verringert werden. Das gelingt bei kleineren Fragmenten noch besser, würde aber den MAC-Overhead weiter erhöhen.

Werden im Halbduplex-Betrieb große PHY-Frames übertragen, erhöht sich für die Gegenrichtung die Latenz bis Pakete gesendet werden können. Variiert die Länge der PHY-Frames, so führt das zu einem Latenzjitter. Verlangen die Dienstgütekriterien kleinere Latenzen oder einen begrenzten Jitter, so muß die PHY-Datenrate angepaßt werden bzw. große Längenänderungen der PHY-Frames durch kleinere Fragmente verhindert werden.



Tabelle 5.9: Fragmentfolgestruktur mit einer Fragmentlänge von 2048 Bytes

SEQ	Fragment	LEN	FGNR(3..0)	Offset	Rest
N	1	7593	"1000"	0	7593
N	2	7593	"1001"	2048	5553
N	3	7593	"1010"	4096	3513
N	4	7593	"0011"	6144	1449
N+1	-	1364	"0000"	0	1364
N+2	-	563	"0000"	0	563

Für das System wird eine maximale Fragmentlänge festgelegt. Diese kann abhängig von den aktuellen Kanalbedingungen oder den Dienstgüteanforderungen gewählt werden. Tabelle 5.9 zeigt ein Beispiel der Fragmentverwaltung mehrerer Pakete (7593, 1364, 563 Bytes) mit den entsprechenden Werten für SEQ, LEN, FGNR bei einer Fragmentlänge von 2048 Bytes. Alle Pakete mit gesetztem MSB<sup>79</sup> von FGNR haben genau die Fragmentlänge als Paketlänge. Die unteren Bits stehen für die Fragmentnummer. Ein nicht gesetztes MSB zeigt ein unfragmentiertes Paket an, wenn die Fragmentnummer Null ist, sonst ist dieses Paket das letzte Fragment eines Pakets. Im vorgestellten System ist FGNR vier Bits breit und erlaubt somit maximal acht Fragmente. Die Länge (LEN) beschreibt immer die Gesamtgröße des unfragmentierten Paketes. Aus jedem Fragment lässt sich außerdem die maximale Fragmentlänge errechnen.

Der Overhead wird durch die zusätzlichen Aggregationsheader und Prüfsummen (HCS, FCS) für die Fragmente erzeugt. Ein 9000 Byte langes Paket wird in fünf Fragmente mit einer maximalen Fragmentlänge von 2048 Bytes unterteilt. Damit beträgt der gesamte Overhead 0,9% bezogen auf die Paketlänge.

#### 5.4.5. Aggregation von Paketen

Die Aggregation erfolgt in der MAC-Schicht durch einfaches Aneinanderfügen der einzelnen Pakete. Der Aggregationsheader enthält alle wichtigen Informationen für das jeweilige Paket. Die Anzahl der aggregierten Pakete ist abhängig von der maximalen Nutzdatenlänge der MPDU und des PHY-Frames. Die Aggregation der Pakete wird direkt in der Ausgabereinheit (Packet-ASM) durchgeführt. Ein Problem dabei ist, dass die Länge des Gesamtpaketes (MPDU) so früh wie möglich bekannt sein muß, da der PHY- und der MAC-Header u.a. diese Information benötigen. Der MAC-Header ist Bestandteil der MPDU und wird als Erstes ausgegeben. Der PHY-Header wird separat an den Basisbandprozessor übergeben und leitet den Sendeprozess ein.

Werden fragmentierte Pakete in einer MPDU aggregiert, so hat das den Vorteil, dass kleinere Paketfragmente aufgrund der geringeren Paketfehlerrate sicherer übertragen werden und im Fehlerfall nur das Fragment neu übertragen werden muß.

#### 5.4.6. Unterstützung von Dienstgüteeigenschaften (QoS)

Den eingehenden Paketen werden anhand ihres VLAN-Tags ein Ziel aus der VLAN-ID und eine Priorität aus dem CoS-Feld zugeordnet. Ist kein VLAN-Tag enthalten, so wird direkt die Ziel-MAC-Adresse genutzt, um den Ausgabeport zu finden. Die Zuordnung der MAC-Adressen zu den Ports wird aus den empfangenen Paketen erlernt. Als Priorität wird dann die Best-Effort-Klasse zugewiesen (siehe Abschnitt 3.1.1 auf Seite 24).

<sup>79</sup>Most Significant Bit - Bit mit der höchsten Bitwertigkeit.

## 5. Hardwareimplementierbares MAC-Protokoll für drahtlose Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung

Jedem Datenstrom, welcher einer VLAN-ID entspricht, kann ein (vereinbartes) Bandbreitenprofil zugeordnet werden. Dieses wird anschließend z.B. mit Hilfe zweier Token-bucket-Traffic-“Shaper“ überprüft [71]. Ein Paket entspricht nicht den Vereinbarungen, wenn keine Token im jeweiligen Modul verfügbar sind. Als Ergebnis werden die Pakete z.B. mit den Farben grün, gelb und rot markiert. Rote werden sofort verworfen, Gelbe bei Bedarf. Das VLAN-Tag kann eine Markierung über den Drop Eligible Indicator (DEI) mitliefern [52].

### 5.4.6.1. Admission Control

Kann die Bandbreite nicht eingehalten werden, so müssen Pakete verworfen werden. Dabei werden zuerst die Roten und dann die Gelben in Betracht gezogen. Änderungen der Übertragungskapazität ergeben sich durch die Anpassung der Modulation und der Kodierung (ACM) aufgrund einer Änderung der Übertragungsbedingungen.

### 5.4.6.2. Traffic-Shaping

Mit Hilfe eines Traffic-Shapers können Paket-Bursts abgefangen und die Bandbreite auf einen maximalen Wert begrenzt werden. Ein Traffic-Shaper benötigt dafür am Eingang Speicher, in dem die Lastspitzen gepuffert werden. Bei Nutzung der Datenflusskontrolle ist es nicht möglich, dass der Puffer überläuft, da diese Spitzen gar nicht auftreten. Somit ist ein Traffic-Shaper in diesem Fall nicht notwendig. Ohne Datenflusskontrolle muß der Speicher entsprechend der zu erwartenden Bandbreite zuzüglich der Spitzen dimensioniert werden. Ausreißer werden dann über die *Admission Control*-Komponente beseitigt.

### 5.4.6.3. Paketplaner für QoS

Das VLAN-Tagging erlaubt acht Prioritätsklassen. Die klassifizierten Pakete werden entsprechend auf acht Warteschlangen aufgeteilt. Tabelle 3.1 auf Seite 25 zeigt eine Zuordnung der acht Prioritäten auf vier *Access Categories*, welche bei Nutzung dann auch nur vier Warteschlangen benötigen. Diese Methode kann eingesetzt werden, um Hardwareressourcen zu sparen.

Auf der anderen Seite der Warteschlangen befindet sich der Paketplaner. Dieser liest die Pakete entsprechend einer zugeordneten Vorschrift aus den Warteschlangen aus. Eine Vorschrift kann z.B. eine bestimmte (maximale) Bandbreite oder eine (maximale) Latenz festlegen. Im vorgeschlagenen System wird jeder Priorität eine entsprechende Bandbreite zugeordnet. Die Ausgabe der Paketplaner wird der Paketsendesteuerung übergeben (siehe Abschnitt 7.4.2.7 auf Seite 130).

Der Weighted-Fair-Queueing (WFQ) Algorithmus kann eine Bandbreite und eine begrenzte Ende-zu-Ende-Verzögerung garantieren. Der Deficit Weighted Round Robin (DWRR) Algorithmus garantiert Bandbreiten. Der DWRR eignet sich aufgrund der geringen Komplexität und des hohen Datendurchsatzes besonders für die Integration in eine Hardware. Wie schon in Abschnitt 3.1.3 auf Seite 26 beschrieben, lässt sich auch der WFQ-Algorithmus nutzen. Dieser benötigt aber eine höhere Verarbeitungszeit und mehr Ressourcen für die Verwaltung [19].

### 5.4.7. Fehlererkennung und -korrektur mit selektivem ARQ von Knoten zu Knoten

Die Datenpakete werden von Knoten zu Knoten bestätigt und selektiv neu übertragen. In einem Single-Hop-System wird damit gleichzeitig eine Ende-zu-Ende-Bestätigung durch-

geführt.

Ist eine Ende-zu-Ende-Bestätigung auch für Multi-Hop-Systeme notwendig, müssen die Bestätigungen vom Endknoten wieder an den Startknoten zurückgesendet werden. Das erfolgt am Besten auf demselben Weg (rückwärts) mittels Source-Routing und mit höchster Priorität. Dazu müssen die Zwischenstationen der Pakete aufgezeichnet werden. Der Verlust eines Paketes bzw. dessen Bestätigung (ACK) hat zur Folge, dass das Paket erneut übertragen werden muß und wieder Ressourcen (Bandbreite, Puffer) auf allen Zwischenknoten benötigt. Außerdem muß für die Auslösung einer Neuübertragung im Startknoten eine Wartezeit definiert werden. Diese ist abhängig von der Anzahl der Zwischenstationen und den Übertragungsparametern zwischen diesen und muß dem Startknoten bekannt sein.

Eine Ende-zu-Ende-Semantik bei den Bestätigungen benötigt keine zusätzlichen Verwaltungsressourcen in den Zwischenknoten. Ein Zwischenknoten leitet das Paket abhängig von der Routingtabelle an die nächste Station weiter. Das Paket muß *nur* bis zum Senden gespeichert und der belegte Speicher nach dem Senden wieder freigegeben werden.

Die selektive Neuübertragung erfordert eine Nummerierung der Pakete mittels einer Sequenznummer (MSEQ). Diese gilt nur für die Übertragung zum nächsten Knoten. Jedes Paket wird um eine 32-Bit-CRC über den AH und die Daten erweitert. Diese dient im Empfänger zur Fehlererkennung. Ein gleitendes Fenster koordiniert die Sendepufferverwaltung und die Reihenfolge der Wiederholungen. Bestätigte Pakete werden im Sendepuffer gelöscht. Wird die maximale Anzahl der Sendewiederholungen überschritten, so wird der Speicher ebenfalls freigegeben. Ist dieses Paket ein Fragment, so hat das zur Folge, dass alle anderen Fragmente dieses Paketes nutzlos werden. Eine Maßnahme ist, diese komplett zu löschen und nicht weiter zu übertragen. Eine weitere wäre, die maximale Anzahl der Sendewiederholungen zu erhöhen. Zusätzlich kann die Übertragung mit einer stärkeren Kodierung bzw. einer robusteren Modulation erfolgen.

Die Bestätigungen werden abhängig vom Sender gespeichert und bei der nächsten Gelegenheit mit dem MAC-Headers oder dem Post-ACK-Block wieder zurückgeschickt.

### 5.4.8. Direktionaler Medienzugriff mittels TDMA und Polling

Der Medienzugriff erfolgt über TDMA, wobei die Zugriffszeit in Zeitslots eingeteilt wird. Diese wiederum sind, angeführt von einem Beacon-Slot und einem Beacon-Suchslot, in einem Rahmen (Superframe) gruppiert. Der Rahmen wird periodisch wiederholt und fortlaufend nummeriert. Die Zuordnung der Verbindungen zwischen den Stationen wird durch die Slotbelegungsmatrix gesteuert (siehe Abschnitt 5.3.3). Innerhalb der Slots wird der Medienzugriff mittels Polling durchgeführt. Der jeweilige Master aller aktiven Verbindungen des aktiven Slots koordinieren den Datentransfer. Es steht eine Halbduplex-Verbindung zur Verfügung.

Abbildung 5.3 zeigt die Rahmenstruktur im Punkt-zu-Mehrpunkt-Betrieb und Abbildung 5.5 auf Seite 89 zeigt die Rahmenstruktur im Punkt-zu-Punkt-Betrieb mit einem zusätzlichen Slot für den direkten Zugriff einer Anwendung auf das Medium. Zu jedem Beginn eines Slots wird die entsprechende Strahlkonfiguration eingestellt.

Der Master bestimmt die Menge der angeforderten Daten über die Festlegung der Anzahl der zu sendenden MPDUs. Die MPDU-Länge wird über einen Parameter bestimmt, der mit dem Beacon an die Slave-Stationen verteilt wird. Muß eine Blockübertragung am Ende eines Slots abgebrochen werden oder geht das letzte PHY-Frame mit Daten oder einem Block-ACK verloren, wird zu Beginn des nächsten äquivalenten Slots ein Request ohne Daten gesendet. Die Gegenstation antwortet nun mit einem PHY-Frame, das nur

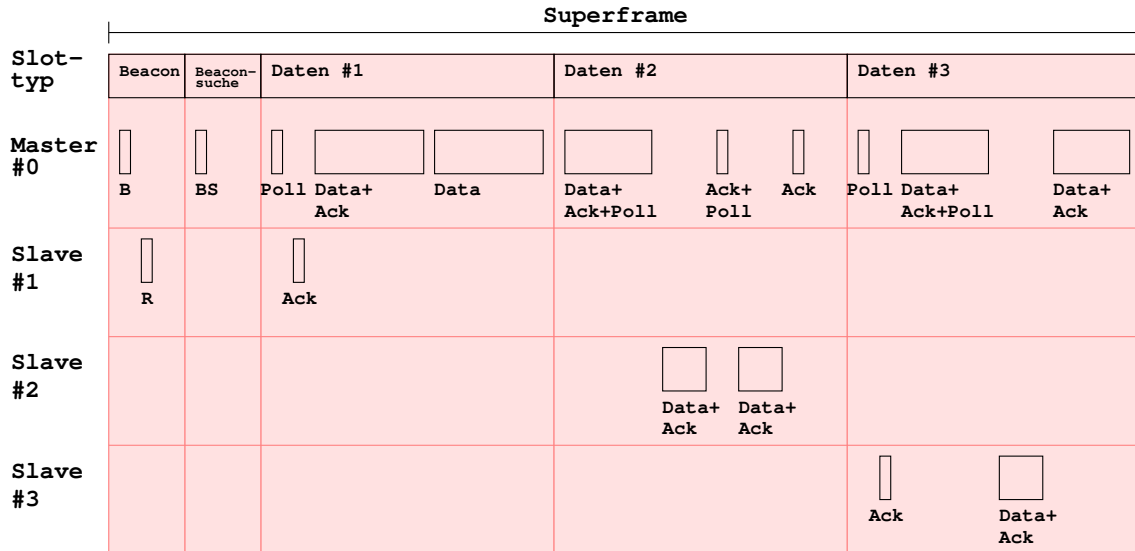


Abbildung 5.3: MAC-Rahmenstruktur im Punkt-zu-Mehrpunkt-Betrieb

den MAC-Header mit Bestätigungen enthält. Das verhindert, dass schon gesendete, aber noch nicht bestätigte Pakete noch einmal übertragen werden.

Die Einstellung der Sendeleistung für die aktuelle Strahlkonfiguration kann direkt aus den Ergebnissen der Nachbarschaftssuche entnommen werden. Eine kontinuierliche Anpassung der Sendeleistung kann ohne Zusatzinformationen vom Empfänger auf Basis der Paketfehlerrate (nicht bestätigte Pakete) erfolgen. Dabei muß die Erhöhung der Sendeleistung nicht unbedingt zu einer Verbesserung der Paketfehlerrate beitragen, da z.B. der Empfänger übersteuert sein kann. Erhält der Sender ein Feedback über die Empfangsleistung des gesendeten Signals (RSSI, Leistung der Präambel) z.B. mit dem Beacon, kann abgeschätzt werden, in welche Richtung die Sendeleistung angepaßt werden muß.

Mit den verfügbaren analogen Frontends des IHP sind keine direkten RSSI-Messungen möglich. Erst die künftige Generation verfügt über einen Leistungssensor am Ausgang des integrierten Low-Noise Amplifiers (LNA). In das RSSI-Signal muß deshalb auch die Verstärkung/Dämpfung des LNA mit eingerechnet werden. Der RSSI-Ausgang wird gleichzeitig für die AGC<sup>80</sup> genutzt, um das analoge Signal optimal an den Dynamikbereich der AD-Wandler anzupassen. Der RSSI kann permanent über einen direkten Pfad an den MAC übermittelt werden bzw. einmalig nach dem Empfang einer Präambel. Die PLCP-Schnittstelle wurde schon für die Übermittlung des RSSI-Wertes an den MAC für jedes empfangene Paket vorbereitet. Die permanente RSSI-Übertragung ist für die intelligente Leistungssteuerung in der Nachbarschaftssuche notwendig, da hier der Kanal kontinuierlich überwacht werden muß, um die Dauer einer Übertragung zu ermitteln. Algorithmus 6 auf Seite 157 zeigt eine mögliche Implementierung der Sendeleistungssteuerung über eine Paketfehlerratenüberwachung. Der Algorithmus kann in Software oder als endlicher Automat in Hardware implementiert werden. Der Algorithmus kann z.B. in einem Abstand von einer Sekunde mit der aktualisierten PER ausgeführt werden. Algorithmus 7 auf Seite 158 steuert die Sendeleistung der Gegenstation auf Basis des RSSI beim Empfang der Präambel.

Hilft eine Anpassung der Sendeleistung nicht, um die Fehlerrate zu senken, muß die Modulation und/oder das Kanalkodierungsverfahren angepaßt werden (ACM). Eine daraus

<sup>80</sup>AGC - Automatic Gain Control

folgende Verringerung des Datendurchsatzes kann u.U. dazu führen, dass die Anforderungen an die Dienstgütekriterien nicht mehr garantiert werden können. Der Algorithmus für die Einstellung der PHY-Datenrate (ACM) ist ähnlich dem der Sendeleistungssteuerung. Mit jeder Änderung der PHY-Datenrate (Modulation+FER) müssen die Bandbreiten im Paketplaner (DWRR) angepaßt werden, indem die *Quantum Size*-Register der *Deficit Counter* entsprechend der verfügbaren Bandbreite geladen werden. Die abhängigen Bestätigungswartezeiten werden dynamisch für die jeweilige Modulation und Kodierung errechnet. Die Slave-Station antwortet immer mit der gleichen Modulation und Kodierung wie die von ihr empfangenen PHY-Frames.

In Full-Duplex-Verbindungen kann von Polling auf einen kontinuierlichen Betrieb in den Datenslots übergegangen werden. Um unnötige Wiederholungen zu vermeiden, muß die Länge des gleitenden Fensters des Sendepuffers angepaßt werden. Die Wiederholung nicht bestätigter Pakete beginnt z.B. nach dem Erreichen der letzten Sequenznummer des Sendepuffers (siehe Abschnitt 3.2.4 auf Seite 28).

#### 5.4.8.1. Rahmenaufbau (Superframe)

Im Beispielsystem mit acht Slave-Stationen  $N_{SLV} = 8$  soll eine möglichst geringe Latenz von der Anfrage bis zum Empfang der Antwort (Round-Trip-Time) erreicht werden. Dazu wird die Rahmendauer auf  $T_{Beacon\_Period} = 1\text{ ms}$  festgelegt. Weiterhin wird ein Zeitabschnitt für Beacons und einer für die Nachbarschaftssuche reserviert:  $T_{Beacon} = T_{Beacon\_Srch} = 50\text{ }\mu\text{s}$ . Die abgeleiteten Zeiten werden nach folgenden Formeln berechnet:

$$T_{SLOT} = T_{BP\_FS} + T_{ACCESS} \quad (50)$$

$$T_{Cycle} = N_{SLV} \times T_{SLOT} \quad (51)$$

$$T_{Beacon\_Period} = T_{Beacon} + T_{Beacon\_Srch} + T_{Cycle} = 1\text{ ms} \quad (52)$$

$T_{ACCESS}$  ist die Zeit, die für die eigentliche Datenkommunikation zur Verfügung steht. Diese wird über das Polling-Verfahren in Upload- und Download-Phasen eingeteilt. Dabei kann das Up- und Download-Verhältnis  $T_{UP} : T_{DOWN}$  statisch und dynamisch festgelegt werden.

#### 5.4.8.2. Beacon-Zeitabschnitt und Verteilung der Beacons

Der Beacon-Zeitabschnitt ist exklusiv für die Übertragung eines Beacons zur Zeitsynchronisierung und zum Einstellen von Systemparametern (Pufferstatus, Linkqualität) reserviert. Die Strahlkonfiguration des Beacon-Zeitschlitzes ergibt sich aus der zyklischen Nutzung der *Slotbelegungsmatrix* abhängig von der laufenden Rahmennummer, d.h. die Rahmennummer modulo der Anzahl der Datenslots bestimmt den Spaltenindex (Slot) der *Slotbelegungsmatrix* und der *Master-Slave-Rollenverteilungsmatrix*. Die Strahlkonfiguration und Rollenverteilung des errechneten Slots wird in den entsprechenden Knoten für die Verteilung der Beacons verwendet. Damit erhält jeder Slave-Knoten nicht in jedem Beacon-Slot ein Beacon, wenn der Master mehrere Slaves bedienen muß.

Bei der Initialisierung bzw. dem Verlust der Verbindung, z.B. wenn eine bestimmte Anzahl von Beacons nicht empfangen wurde, muß der Slave neu synchronisiert werden. Dabei wird die Strahlkonfiguration eines Slots mit der kürzesten Verbindung zum Masterknoten ausgewählt. Nach einer erfolgreichen Synchronisierung durch den Empfang eines Beacons kann aus der Rahmennummer der aktuelle Slot für die Auswahl der Strahlkonfiguration bestimmt werden. Die Dauer der Synchronität zwischen den Stationen ist abhängig von

der Takt drift. Die Taktfrequenzanpassung (Syntonization) lässt sich z.B. durch das direkte Verstellen der Taktfrequenz des Taktgebers (TCVCXO<sup>81</sup>) durchführen. Die Stellgröße wird z.B. durch den Vergleich empfangener Zeitstempel mit der internen Uhr ermittelt. Ein Quasi-Zeitstempel ist auch der Empfangszeitpunkt eines periodisch versendeten Beacons. Die Differenz wird zwischen dem Erwartungswert des Eintreffens des Beacons und dem tatsächlichen Empfangszeitpunkt gebildet.

### 5.4.8.3. Datendurchsatz

Die erreichbaren Datenraten pro Teilnehmer sind abhängig von der Anzahl der Slaves, der eingesetzten Modulation und Kanalkodierung sowie der Dauer der Zeitschlitz. Tabelle 5.10 zeigt eine Übersicht der abhängigen Parameter und der erreichbaren Datenraten pro Teilnehmer für eine Rahmendauer von  $T_{Beacon\_Period} = 1\text{ ms}$ , der Dauer des Beacon-Slots  $T_{Beacon} = 50\text{ }\mu\text{s}$  und der Dauer des Beacon-Suchslots  $T_{Beacon} = 50\text{ }\mu\text{s}$ . Folgende Parameter sind dargestellt: Anzahl der Brutto-Daten per Slot  $NB_S$ , Zeitdauer für Uplink  $T_{UP}$ , Zeitdauer für Downlink  $T_{DOWN}$ , Netto-Datendurchsatz für den Uplink  $TPN_{UP}$  und für den Downlink  $TPN_{DOWN}$ .  $NN_S$  enthält nur die Nettodaten von aggregierten Paketen mit maximal 1024 Byte Datenpayload.

Tabelle 5.10: Datendurchsatz abhängig von der Anzahl der Slaves  $T_{UP} : T_{DOWN} = 1 : 3$

PHY-DR	$T_{UP}$	$NB_S$	$NN_S$	$TPN_{UP}$	$T_{DOWN}$	$NN_S$	$NB_S$	$TPN_{DOWN}$
[Gbit/s]	[ $\mu\text{s}$ ]	[Bytes/Slot]		[Mbit/s]	[ $\mu\text{s}$ ]		[Bytes/Slot]	[Mbit/s]
1,3	55,8	8256	8093	64,7	167,5	26400	25964	207,7
2,6		16512	16236	129,8		52800	51964	415,7
3,9		24768	24364	194,9		79200	77963	623,7

(a) 1 Master & 4 Slaves  $T_{SLOT} = 224,1\text{ }\mu\text{s}$

PHY-DR	$T_{UP}$	$NB_S$	$NN_S$	$TPN_{UP}$	$T_{DOWN}$	$NB_S$	$NN_S$	$TPN_{DOWN}$
[Gbit/s]	[ $\mu\text{s}$ ]	[Bytes/Slot]		[Mbit/s]	[ $\mu\text{s}$ ]		[Bytes/Slot]	[Mbit/s]
1,3	27,7	3744	3660	29,2	83,2	12864	12636	101,0
2,6		7488	7340	58,7		25728	25308	202,4
3,9		11232	11035	88,2		38592	37962	303,6

(b) 1 Master & 8 Slaves  $T_{SLOT} = 111,7\text{ }\mu\text{s}$

### 5.4.8.4. Single-Hop

Eine Punkt-zu-Punkt- bzw. eine Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindung ohne Zwischenverbindungen benötigt wenig Aufwand für den Betrieb. Die Slaves konfigurieren einmalig ihre Strahlkonfiguration direkt auf den Master und sind immer empfangsbereit. Der Master wechselt je nach Bedarf zwischen den Slaveknoten, indem die entsprechende Strahlkonfiguration des Slaves ausgewählt wird.

Abbildung 5.4a auf der nächsten Seite zeigt ein Szenario mit einem Master und acht Slaves. Alle Slaves werden im Normalfall mit der gleichen Zugriffsrates und -dauer angesteuert. Die effektive Nutzungsdauer ist abhängig von der Dauer der Programmierung und der Umschaltzeit der Antenne. Es sollten mindestens so viele Registerbereiche im VM-IC für die Strahlkonfigurationen zur Verfügung stehen wie Slaves vorhanden sind. Dann müssen

<sup>81</sup>TCVCXO - Temperature Compensated Voltage Controlled Crystal Oscillator

der Master und alle Slaves nur einmal konfiguriert werden. Sind mehr Slaves als Registerbereiche vorhanden, muß jeweils umkonfiguriert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass ein Zeitabschnitt  $T_{SLOT}$  nicht kleiner als  $T_{BP\_CFG\_FS}$  werden kann, wenn jedem Slave die gleiche Zugriffszeit zugestanden wird.

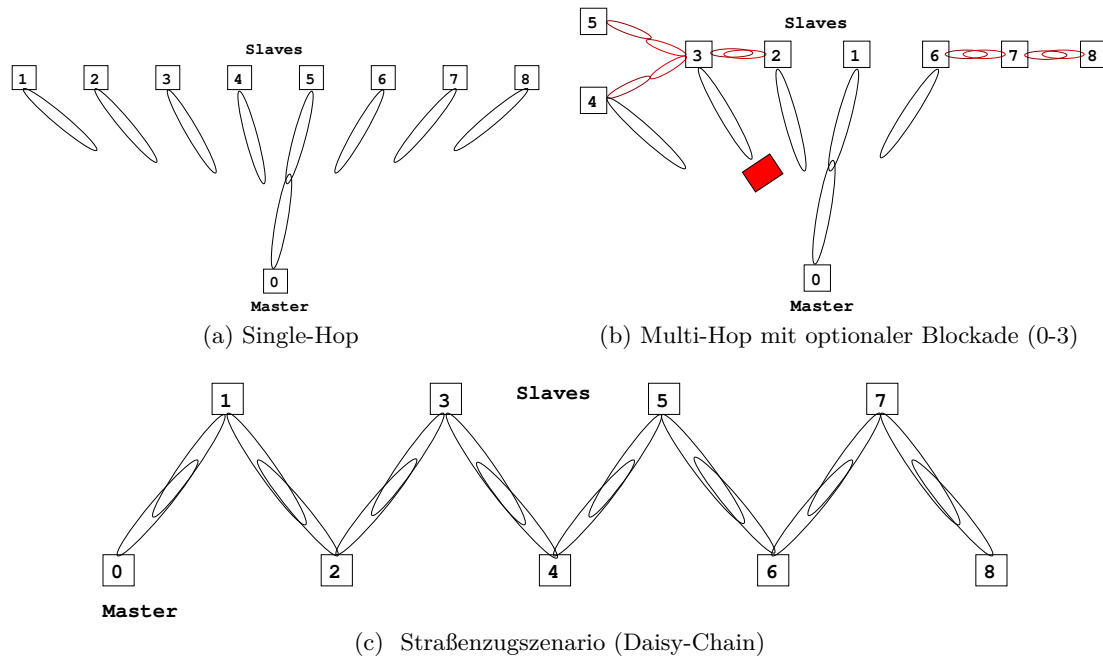


Abbildung 5.4: Punkt-zu-Mehrpunkt Szenarien

#### 5.4.8.5. Multi-Hop

Abbildung 5.4c zeigt ein Daisy-Chain-Szenario und Abbildung 5.4b ein gemischtes Single- und Multi-Hop-Szenario. Das letztgenannte Szenario beinhaltet auch redundante Verbindungen zwischen Knoten 2 und 3 bzw. zwischen Knoten 3 und 4, so dass beim Ausfall (roter Block in der Abbildung) bzw. beim Abschalten einer Verbindung (Blockierung, Umwelteinflüsse, Knotenausfall, Stromsparbetrieb) eine alternative Verbindung benutzt werden kann.

Der Multi-Hop-Betrieb beinhaltet u.a. folgende Herausforderungen, die im vorgeschlagenen MAC-Protokoll berücksichtigt wurden:

- Alle Knoten müssen zeitlich synchronisiert werden, so dass alle Strahlkonfigurationen zur selben Zeit umschalten (siehe Abschnitt 7.4.4.2 auf Seite 135).
- Vor jeder Kommunikation zwischen Knoten A und Knoten B muß die passende Strahlkonfiguration in beiden Knoten ausgewählt werden (siehe Abschnitt 7.4.4.1 auf Seite 135).
- Weiterhin muß die Abfolge der Verbindungen zwischen allen Knoten so koordiniert werden, dass die geforderten Bandbreiten und Latenzen eingehalten werden (siehe Abschnitt 5.3.3.1 auf Seite 76).
- Die Blockierung der Verbindung zwischen zwei Knoten verursacht den Totalausfall der Verbindung und aller von dieser Verbindung abhängigen Knoten, wenn keine

alternative Verbindung über andere Knoten hergestellt werden kann. Die Umschaltung zur alternativen Slotbelegungsmatrix im Blockadefall muß von allen beteiligten Knoten durchgeführt werden (siehe Abschnitt 5.3.4).

Wenn längere Zeit nicht synchronisiert werden kann, verursacht die Taktdrift den Verlust der Zeitschlitzübereinstimmung zwischen den Knoten. Dadurch ist ein interferenzfreier Zugriff nicht mehr möglich. Das kann passieren, wenn die Verbindung längere Zeit unterbrochen wurde und keine Synchronisation (z.B. durch ein Beacon) erfolgen konnte (siehe Abschnitt 5.4.8.2 auf Seite 85). Bleibt der Empfang mehrerer Beacons in den Slaves aus, wird in den Slaves die Standardstrahlkonfiguration eingestellt und auf den Empfang eines Beacons gewartet, um die Station wieder zeitlich synchronisieren zu können.

### 5.5. Funktionen der Bitübertragungsschicht (PHY)

Die Bitübertragungsschicht stellt den OFDM-Basisbandprozessor, ein RSSI des Empfangssignals vom analogen Frontend und eine Anwendungsschnittstelle zum Übertragungskanal zur Verfügung.

#### 5.5.1. Digitale Basisbandverarbeitung

Der verwendete Basisbandprozessor aus [49, 50] ist als FPGA-Hardware verfügbar. Die möglichen PHY-Datenraten abhängig von der Modulation und Kodierung sind in Tabelle A.1 auf Seite 153 aufgeführt.

#### 5.5.2. RSSI

Das RSSI ist für den Medienzugriff selbst nicht notwendig. Der Algorithmus der Nachbarschaftssuche profitiert von der Verfügbarkeit des RSSI, indem ein PHY-Frame nur an seiner Länge erkannt wird. So kann auf eine Anfrage bzw. Antwort geschlossen werden, obwohl der Empfänger übersteuert ist. Die Sendeleistungssteuerung (Algorithmus 7 auf Seite 158) benötigt vorzugsweise das RSSI, um die Sendeleistung der Gegenstation zu steuern.

#### 5.5.3. Anwendungsschnittstelle für den Zugriff auf das Übertragungsmedium

Diese Schnittstelle stellt in Hardware integrierte Algorithmen/Verfahren einen direkten Zugriff auf den Kanal über die DA- und AD-Wandler bereit. Dazu wird vom MAC ein Zeitabschnitt (HW-Alg) für den exklusiven Zugriff reserviert, um zu verhindern, dass andere Teilnehmer darauf zugreifen bzw. um die Empfänger stumm zu schalten. Dieser Slot steht nicht für die Datenübertragung zur Verfügung. Abbildung 5.5 zeigt die Einbindung des *HW-Alg*-Slots in die Rahmenstruktur. Nach dem Beginn des Slots wird die Strahlkonfiguration eingestellt. Danach werden die AD- und DA-Wandler im PHY über ein PLCP-Kommando auf das *ausgewählte* Hardwaremodul geschaltet. Dieses beginnt nach der Konfiguration mit der Ausführung der Funktion. Nach einer festgelegten Zeit werden die Wandler wieder mit dem Basisbandprozessor verbunden und das Ergebnis der Hardwaremoduloperation wird über die PLCP-Schnittstelle in einen Registerbereich der MAC-Komponente übertragen. Die Position und Anzahl der Wiederholungen des HW-Alg-Slots kann im Rahmenzeitgeber frei festgelegt werden (siehe Abschnitt 7.4.4.1 auf Seite 135).



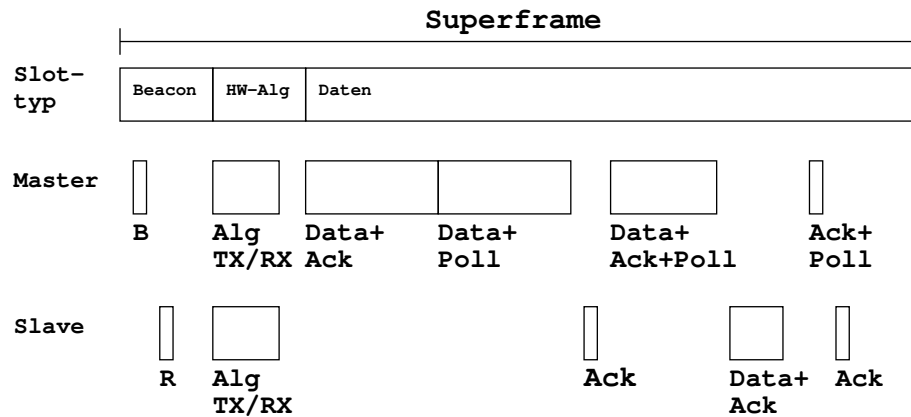


Abbildung 5.5: MAC-Rahmenstruktur im Punkt-zu-Punkt-Betrieb mit Algorithmus-Slot

Die Funktion der Hardware geht von einer Aufzeichnung der Abtastwerte (low-level) bis hin zur kompletten Integration eines komplexen Verfahrens, wie der, durch den Autor dieser Arbeit in [1] vorgestellten, Abstandmessung nach dem Laufzeitverfahren (siehe Abschnitt 7.2.4).

## 5.6. Protokollsteuerung und Datenpaketformat

Nach dem Anschalten des Systems erfolgt die Konfiguration der Geräteinformationen. Diese sind z.B. die Geräte-MAC-Adresse, die IP-Adresse für den UDP-Server und die Knotenadresse. Weiterhin werden die Parameter für den Medienzugriff initialisiert. Darunter fallen die vorberechneten Matrizen der Slotbelegung und die Tabellen der Slotkonfiguration sowie die zeitlichen Vorgaben für die Rahmendauer und den Datenslots. Der Rahmenzeitgeber (RZG) wird nur im Master initialisiert und gestartet. Mit dem Start des RZG beginnt die Rahmenstruktur mit einem Beacon-Slot und dem Aussenden eines Beacons für den ersten Slot der Slotbelegung.

Sind die Positionen und Ausrichtungen der Antennen der Stationen aus einer gespeicherten Nachbarschaftssuche bekannt, erfolgt auf ein Beacon-Request ein Beacon-Response. Mit dem empfangenen Beacon-Request wird u.a. die Rahmendauer und die Rahmennummer übermittelt. Mit diesen Werten kann der RZG im ausgewählten Slave gestartet werden. Ab jetzt sind die Slaves synchronisiert. In einem Multi-Hop-System kann ein Slave gleichzeitig die Rolle des Master für den nächsten Hop einnehmen.

Eine Ad-Hoc-Funktionalität kann mit der Durchführung einer Nachbarschaftssuche während des laufenden Protokolls erreicht werden (siehe Abschnitt 5.3.2). Nicht bekannte Stationen können damit dem System hinzugefügt werden. Dazu müssen alle erreichbaren Stationen ihre Slotbelegungsmatrizen und Routing-Tabellen aktualisieren. Diese Aktualisierung sollte von einer zentralen Instanz z.B. im Master initiiert werden. Die Ad-Hoc-Methode ist nur geeignet, wenn die Zeit für das Suchen einer Nachbarstation keine große Rolle spielt bzw. die Anzahl der Strahlkonfigurationen so klein ist, dass sich erträgliche Suchzeiten ergeben. Die ersten drei Einträge der Tabelle 5.6a auf Seite 75 zeigen die Suchzeiten beim Test einer Slotkonfiguration pro Beacon-Suchslot. Die Suche dauert bei 512 Strahlkonfigurationen ca. 5 min, bei 256 ca. 1 Minute und bei 128 ca. 17 Sekunden.

### 5.6.1. Fehlerbehandlung

Wenn Stationen ausfallen, treten Fehlerzustände auf, sei es durch Verbindungsblockaden oder (temporäre) Hardwarefehler. Der ungünstigste Fall tritt ein, wenn der Master ausfällt. Dann verlieren alle Knoten nacheinander die Synchronisation mit ihrem jeweiligen Master. Nach dem (Wieder-)Einschalten eines Masters kann dieser so lange warten, bis alle Knoten in den Synchronisierungsfehlerzustand eingetreten sind. In diesem Zustand richten sich alle Slaves auf ihren Master aus und warten auf ein Beacon. Die Wartezeit lässt sich leicht über die Anzahl der Hops, die Anzahl der maximal fehlenden Beacons und die Rahmendauer errechnen.

Nach einem Neustart sind alle Pufferzustände verloren. Das kann Probleme mit der Eindeutigkeit der gleitenden Sende- und Empfangsfenster geben. Eine einfache und robuste Lösung ist das Löschen der Puffereinträge bei Verlust der Synchronisation, sofern die Synchronisation nicht durch andere Stationen übernommen wird. Dabei ist zu unterscheiden, ob eine Blockierung oder ein Totalausfall vorliegt. Neustarts können über einen Zähler festgestellt werden. Dieser wird mit dem Beacon übertragen. Dazu wird der Zähler in einem nicht-flüchtigen Speicher (Flash, EEPROM, Batterie-gepufferter SRAM/RTC) gesichert und mit jedem Neustart inkrementiert. Ändert sich der Wert des Zählers während des laufenden Betriebs wissen die Nachbarstationen nach dem Empfang eines Beacons, dass ein Neustart erfolgte und können die entsprechenden Puffer zurücksetzen.

Blockierte Verbindungen werden erkannt, wenn keine Synchronisierung durch Beacons erfolgt und/oder keine Datenübertragung in den Datenslots möglich ist. Bei mehreren Nachbarknoten werden die Beacons mit jedem Beacon-Slot an einen anderen Knoten gesendet, so dass die Detektierung, ausschließlich über Beacons, mehrere Rahmen benötigt. Es werden deshalb die Beacon- und die Datenslots für die Blockierungdetektierung genutzt. Eine Blockierung wird an den Master gemeldet. Dieser übermittelt die zu benutzende alternative Slotbelegung an alle betroffenen Stationen. Auf die alternative Slotbelegung wird ab einer vorgegebenen Rahmennummer umgeschaltet. Während die alternative Slotbelegung gültig ist, wird die primäre Verbindung im Beacon-Slot getestet und nach der erfolgreichen Wiederherstellung auf die Standardslotbelegung zurückgeschaltet.

### 5.6.2. Latenz und Round Trip Time (RTT)

Abbildung 5.6 auf der nächsten Seite zeigt einen Ausschnitt der Slotbelegung für drei Stationen mit einem Master und acht Slaves nach Tabelle 5.7 auf Seite 77. Folgendes Problem: Ein übergeordnetes Protokoll, z.B. TCP, sendet ein Paket über den Knoten 0 an den Knoten 8 und wartet auf eine Antwort. Dieses Paket muß schnellstmöglich von Knoten 0 nach Knoten 8 über alle Zwischenknoten transportiert werden. Die Antwort muß möglichst genauso schnell vom Knoten 8 wieder zurück an Knoten 0 gesendet werden. Die Zeit vom Senden der Anfrage bis zum Empfang der Antwort wird *Round Trip Time* (RTT) genannt.

Die ideale Lösung ist die Weiterleitung der Pakete mit jedem Datenslot. Das gelingt bei acht Hops mit acht Datenslots innerhalb eines Rahmens. Die Antwort braucht dann wieder einen Rahmen, um am Ziel anzukommen. Die Zwischenknoten wechseln mit jedem Slot zwischen den beiden Nachbarn, so dass immer eine Verbindung zwischen zwei Knoten besteht. Am Anfang eines Slots werden die Daten vom Master zum Slave gesendet und anschließend vom Slave zum Master. Anhand der farbigen Linien kann der Weg der Daten (DATA) und der Bestätigungen (ACK) verfolgt werden. Die Daten vom Master zum Slave sind grün gefärbt, vom Slave zum Master blau und die Bestätigungen rot.

Nach dem Empfang der Daten vom Master steht eine halbe Slotlänge (abhängig vom

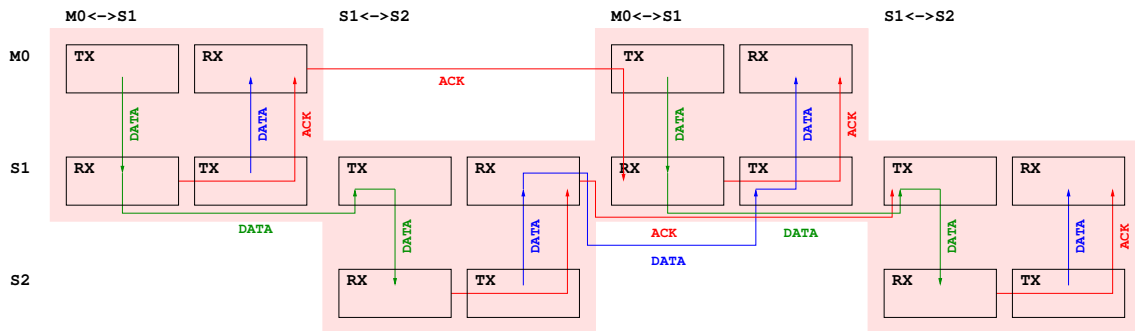


Abbildung 5.6: Detaillierte Übersicht des Daten- und ACK-Transports mit einem „Staggered Schedule“ (versetzt/verschränkt) im Daisy-Chain-Szenario

Up- und Downloadverhältnis) zur Verfügung, um die Daten für die Ausgabe an den nächsten Hop aufzubereiten. Erst einige Zeit ( $T_{RXdel} = 12 \mu s$ ) nach dem Beginn der Sendephase (TX) des selben Slots sind die Daten im Empfänger komplett dekodiert worden (siehe Abschnitt 4.3.2 auf Seite 57). Damit reicht die Zeit nicht, um die kompletten Bestätigungen am Beginn der Sendephase (TX) mit dem MAC-Header zu schicken. Die Bestätigung der später empfangenen Pakete muß deshalb bis zum Ende der Datenübergabe zur Verfügung stehen, um in dieser Sendephase zum Master zurückgesendet werden zu können. Es besteht sonst keine weitere Möglichkeit vor dem übernächsten Datenslot. Die Bestätigungen der zurückgesendeten Daten werden am Anfang des übernächsten Slots übertragen. Problematisch ist hier die Verarbeitungszeit der Bestätigungen, da in der zweiten Hälfte des Slots die Rückübertragungen beginnen. Das Zeitproblem lässt sich lösen, indem das Sende- und das Empfangsfenster vergrößert werden und die Bestätigung auch zwei Datenslots später eintreffen darf. Im vorgestellten MAC-Protokoll können Bestätigungen auch innerhalb einer aggregierten MPDU eingefügt werden (siehe Abschnitt 5.6.3). Weiterhin vergrößern sich die Latenzen, bis nicht bestätigte Pakete wiederholt werden und bis wartende Pakete im Ausgabepuffer ausgegeben werden können.

### 5.6.3. MPDU und Paketformate

Eine MPDU besteht im einfachsten Fall aus einem MAC-Header. Darauf können ein oder mehrere Datenblöcke und/oder Protokollsteuerblöcke folgen. Ein Datenblock besteht aus einem Aggregationsheader (AH) mit den darauf folgenden Daten und der Prüfsumme (FCS). Ein Protokollsteuerblock besteht aus einem Header mit dem darauf folgenden spezifischen Datenteil. Protokollsteuerblöcke sind z.B. der Post-ACK-, der Beacon-, der Schedule- und der Info-Block.

Es gibt zwei MPDU-Typen: die Beacon- und die Daten-MPDU. Die ersten vier Bytes sind bei beiden gleich. Sie beschreiben die Quelle, das Ziel und den MPDU-Typ und zusätzlich für die Daten-MPDU wie diese bestätigt werden soll.

**Beacon-MPDU** Das Beacon besteht aus der Beacon-Nummer (Rahmennummer), der Dauer des Rahmens und weiteren Parametern, die für den grundsätzlichen Betrieb des MAC-Protokolls notwendig sind.

**Daten-MPDU** Eine Daten-MPDU besteht immer aus dem MAC-Header und einer variablen Anzahl aus Daten- und Protokollsteuerblöcken. Der MAC-Header beinhaltet die

Tabelle 5.11: MAC-Protokoll: MPDU-Formate

Pos	Beacon	Daten
0	FFU:AT:FT:SRC:DST	
4	BDUR:BN	ABLK:FLEN
8	SLT:FGM:BRM:AM:PLEN	BRQ:TXBF:RXBU:TXBU:RXBF
12	FFU	ACKV:ABVL:ASEQ
16	HCS	HCS <i>when ABLK=0</i>
		...
44		HCS <i>when ABLK&gt;0</i>

Tabelle 5.12: MAC-Protokoll: Daten- und Post-ACK-Block

Datenblock: PDEL=#'P'		Post-ACK-Block: ADEL=#'A'	
Pos	Bedeutung	Pos	Bedeutung
0	MSRC:MDST:LEN	0	MSRC:MDST:SEQ:LEN
4	PDEL:CRC:TTL:COS	4	ADEL:CRC:FFU
8	RF:MSEQ:FGNR:SEQ	8	ACKV:ABVL:ASEQ
12	PAYLOAD		...
12+LEN	PAD		...
12+LEN+[1 2 3]	FCS32	44	HCS32

Summe der Längen der folgenden Blöcke und ist, genauso wie die Quellen- und Zielangabe, redundant, wenn der PHY diese Informationen als PHY-Frame-Parameter bereitstellt. Weiterhin sind der Pufferstatus, die Sendefreigabe und ein variabler ACK-Block enthalten. Ist der MAC-Header zerstört, so können die folgenden Blöcke trotzdem über ihren Header erkannt und verarbeitet werden, sofern die Prüfsummen korrekt sind. Der Post-ACK-Block kann weitere Bestätigungen aufnehmen. Der Info-Header kann variable Inhalte aufnehmen, z.B. die Rückmeldungen des Verbindungsstatus oder die Auswahlanweisung der aktiven Slotbelegung. Der Schedule-Block enthält die Parameter für die Programmierung des Rahmenzeitgebers. Da die Blöcke mit einer separaten Zielangabe versehen sind, können diese entsprechend weitergeleitet werden. Der Post-ACK-Block kann so auch für Ende-zu-Ende-Bestätigungen genutzt werden.

**Aggregationsheader: CoS-Feld** Das Class-of-Service-Feld (CoS) enthält auf den unteren Bits die CoS nach IEEE 802.1Q. Die oberen Bit bestimmen die Bestätigungsstrategie (NO\_ACK, IMM\_ACK, DEL\_ACK, HYB\_ACK) für das betreffende Paket.

#### 5.6.4. Erhöhung der Robustheit

In [51] wurde gezeigt, dass Wiederholungen wichtiger MPDU-Abschnitte (Header) den Datendurchsatz steigern können. Der Verlust eines Headers hat normalerweise den Verlust des gesamten Blockes zur Folge. Im vorgestellten Beispiel könnte das Verfahren für einen kompletten Block angewendet werden, d.h. der gesamte Block wird dupliziert und hintereinander übertragen. Das Datenformat der Blöcke, mit Ausnahme des Datenblocks, wurde diesbezüglich mit einer Sequenznummer (SEQ) erweitert. Dazu erhält jeder wiederholte Block die gleiche Sequenznummer, um doppelte Verarbeitungen zu vermeiden. Wird

Tabelle 5.13: MAC-Protokoll: Beacon-, Schedule- und Info-Block

Beacon-Block: BDEL=#'B'		Schedule-Block: SDEL=#'S'		Info-Block: IDEL=#'I'	
Pos	Bedeutung	Pos	Bedeutung	Pos	Bedeutung
0	MSRC:MDST:SEQ:LEN	0	MSRC:MDST:SEQ:LEN	0	MSRC:MDST:SEQ:LEN
4	BDEL:CRC:TTL:COS	4	SDEL:CRC:TTL:COS	4	IDEL:CRC:TTL:COS
8	BDUR:BN	8	STO:SBN	8	VAL:LEN:TYPE
12	SLT:FGM:BRM:AM:PLEN	12	SREP:SCNT:SDUR	12	VAL
16	FFU	16	SVLD:SPOS	16	...
20	HCS32	20	HCS32	44	HCS32

nun ein Block gleichen Typs mit gleichem Ziel, gleicher Quelle und gleicher Sequenznummer erkannt, so wird dieser verworfen.

Der Verlust des MAC-Headers ist ein Spezialfall, denn dann geht auch der enthaltene ACK-Block verloren. Mit einem Post-ACK-Block innerhalb der MPDU mit der gleichen Information wie im ACK-Block des MAC-Headers kann die Übertragung der Bestätigungen zuverlässiger erfolgen. Bei einer MPDU mit 16 KiB Größe beträgt der zusätzliche Overhead 0,003%.

#### 5.6.5. Bestätigungen (Block-ACK)

Nachdem ein Paket mit Hilfe der angefügten CRC erfolgreich auf Fehlerfreiheit geprüft wurde, wird die Sequenznummer in einem Bestätigungsblock für den entsprechenden Quellknoten gesammelt. Der ACK-Block kann dann innerhalb des MAC-Headers bzw. mit dem Post-ACK-Block übertragen werden. Viele kleine Pakete erzeugen viele ACKs, d.h. auch das Sendefenster ist schnell ausgeschöpft, obwohl wenig Daten übertragen werden. In ein aggregiertes Datenpaket von 16 KiB passen ca. 215 60-Byte-Pakete, aber nur 10 Pakete bei einer Größe von 1514 Bytes. Gibt es Häufungen aufeinander folgender kleiner Pakete an die gleiche Zieladresse, lohnt es sich, diese in ein eigenständiges Paket zu aggregieren. Das reduziert nicht den Overhead, aber es stehen dann mehr Sequenznummern innerhalb des gleitenden Sendefensters zur Verfügung. Das erhöht die Anzahl der möglichen aggregierten MPDUs, die hintereinander versendet werden können, ohne dass eine Bestätigung gesendet werden muß. Eventuell lässt sich dann das Sendefenster auch verkleinern, um Hardwareressourcen einzusparen (siehe Abschnitt 7.3.2 auf Seite 116).

Für den ACK-Block stehen insgesamt 28 Bytes im MAC-Header und 32 Bytes im Post-ACK-Block zur Verfügung. Am Anfang eines Blockes steht die Startsequenznummer. Die Position eines ACK wird bitweise entsprechend der Startsequenznummer bestimmt. Die maximale Bitbreite für einen Block beträgt 240, die minimale 16. Weiterhin ist es möglich, dass mehrere Abschnitte mit unterschiedlichen Startsequenznummern in einem Block gespeichert werden können. Diese Methode kann die Länge des ACK-Blockes verringern und mehrere nicht zusammenhängende Sequenznummernblöcke bestätigen.

### 5.7. Schnittstellen zu höheren Schichten

Speziell für das vorgestellte System besteht über eine Anwendungsschnittstelle Zugriff auf den Kanal über die AD-/DA-Wandler (siehe Abschnitt 5.5.3 auf Seite 88 und Abschnitt 7.2.4 auf Seite 113). Die Anwendung kann ein ausgewähltes Hardwaremodul über eine Speicherschnittstelle konfigurieren. Die Ausführung der Funktionalität des Hardwaremoduls erfolgt über eine Reservierungsanforderung (Belegung eines Slots) des Kanals im

MAC-Protokoll. Die Verarbeitung kann einmalig nach Aufforderung, einmal oder mehrmals pro Rahmen bzw. periodisch jeden  $n$ -ten Rahmen erfolgen. Die Anwendung liest dann die Ergebnisse nach der Ausführung zurück.

Während der Laufzeit lassen sich außerdem folgende Funktionen parametrisieren bzw. beobachten:

- Reservierung, Admission Control, Paketplaner
- PHY-Datenrate, Kanalauswahl und -information (ACM, TPC)
- Nachbarschaftssuche (Steuerung, Parametrisierung)
- Netzwerktopologie, (alternative) Slotbelegung, Routing-Tabellen
- Statistiken über empfangene und gesendete Pakete usw.

Dafür wird eine Speicherschnittstelle über einen UDP-Server bereitgestellt. Aktuelle Systeme benutzen z.B. SNMP<sup>82</sup> (v2/v3) als Managementprotokoll (siehe RFC). Die Bereitstellung des Protokolls kann z.B. mit einer Softwareimplementierung auf einem dedizierten Mikrocontroller erfolgen. Das Protokoll läuft als Anwendung und transportiert Daten über UDP. Die Anpassung der Speicherschnittstelle an SNMP erfolgt mit Hilfe einer Abbildung der Bedeutung der Speicherinhalte auf eine MIB<sup>83</sup>. Mit dem SNMP können MIB-Daten gelesen, geschrieben und überwacht werden.

### 5.8. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein MAC-Protokoll vorgestellt, dessen Funktionalität der Datensicherungsschicht komplett in Hardware integrierbar ist. Das Protokoll unterstützt sowohl Single-Hop- als auch Multi-Hop-Szenarien. Das Daisy-Chain-Szenario stellt dabei eine besondere Herausforderung an die interne Datenverarbeitung, wenn kleine Latenzen (RTT) erreicht werden sollen. Der Medienzugriff erfolgt mittels Polling innerhalb von TDMA. Die TDMA-Slots synchronisieren den gemeinsamen Zugriff der Teilnehmer über gerichtete Verbindungen. Zu Beginn eines jeden Slots wird die entsprechende Strahlkonfiguration der Verbindungspaare eingestellt. Diese kann vorberechnet bzw. während der Laufzeit ermittelt werden.

Die Fragmentierung und Aggregation von Paketen ermöglicht zum einen einen hohen Datendurchsatz und zum anderen eine hohe Robustheit bei der Datenübertragung mit Übertragungsfehlern. Ein selektives ARQ-Verfahren ermöglicht die Fehlerkorrektur durch Übertragungswiederholungen von Knoten zu Knoten.

Nicht alle Funktionen der Vermittlungsschicht lassen sich komfortabel in Hardware abbilden. Dazu gehört die Nachbarschaftssuche. Das als Patent angemeldete Verfahren beschleunigt die Nachbarschaftssuche von Stationen mit unbekannter Distanz. Die Nachbarschaftssuche während des laufenden MAC-Protokolls lässt sich mit geringem Aufwand in Hardware integrieren, indem z.B. ein separater Beacon-Suchslot eingeführt wird. Diese Vorgehensweise eignet sich aber nur für eine begrenzte Anzahl von möglichen Strahlkonfigurationen.

Das MAC-Protokoll unterstützt den exklusiven Zugriff einer Anwendung auf das Übertragungsmedium über ein Hardwaremodul im PHY. Dabei erfolgen die Zeitreservierung und die Zugriffssteuerung über das MAC-Protokoll.

---

<sup>82</sup>SNMP - Simple Network Management Protocol

<sup>83</sup>MIB - Management Information Base

Die internen Funktionen lassen sich über eine Speicherschnittstelle konfigurieren und beobachten. Die Integration eines State-of-the-Art Managementprotokolls lässt sich über eine zusätzliche Softwareschicht bewerkstelligen.





## 6. Modellierung und Simulation

Ziel der Simulation ist die Überprüfung der Funktionalität des im Kapitel 5 vorgestellten MAC-Protokolls. Dazu wird ein Modell entworfen, das die gewünschten Szenarien unter verschiedenen Übertragungsbedingungen abbilden kann. Dieses Modell unterstützt die Positionierung der Antennen (Geräte) frei im Raum, so dass neben unterschiedlichen Entfernungen auch unterschiedliche Höhen berücksichtigt werden können. Nicht alle Richtantennen unterstützen einen 360° Schwenkbereich, so dass zusätzlich zur Position im Raum auch eine initiale horizontale und vertikale Ausrichtung vorgegeben werden kann.

Die Simulation erfolgt mit Hilfe der MATLAB-Umgebung. Die Funktionalität wird in einer Software abgebildet und ereignisbasiert ausgeführt. Die Ereignisse werden für einen bestimmten Zeitpunkt geplant und entsprechend der Reihenfolge in der Ereignisliste abgearbeitet. Die Ausführungsgeschwindigkeit der Simulation ist abhängig von der Anzahl der Ereignisse und den abzuarbeitenden Funktionen. Die Anzahl der Ereignisse ist abhängig von der Anzahl der Stationen und den generierten Paketen.

Neben der abstrakten Simulation der Funktionalität kann diese auch nach der Integration über eine Hardwarebeschreibung mit einem entsprechenden Simulator z.B. MODELSIM durchgeführt werden. Die Hardwarebeschreibung erlaubt eine bitgenaue Verhaltenssimulation.

### 6.1. Modellierung der Bitübertragungsschicht

Die Bitübertragungsschicht enthält den Kanal, das analoge Frontend und die Modulations- und Kodierungsverfahren. Die Effekte aus dem Link-Budget wie die Entfernung der Stationen, die Antennenstrahlausrichtung zwischen den Stationen sowie die Sendeleistung werden mit dem Signal-Rausch-Abstand beschrieben. Die PHY-Datenrate und der Signal-Rausch-Abstand dienen als Grundlage für die Ermittlung der BER aus einer PHY-Simulation des OFDM-Basisbandprozessors mit mehreren Kanalmodellen. Damit enthält die BER auch Effekte des Kanals wie Mehrwegeausbreitung, Fading oder Rauschen. Die Signallaufzeit und das Zeitverhalten des digitalen Basisbandprozessors werden über die ereignisbasierte Simulation abgebildet.

#### 6.1.1. Richtantenne mit Beamsteering-Funktionalität

Der Öffnungswinkel einer Antenne wird durch die Abstrahlungsbreite definiert, bei der der Gewinn um 3 dB kleiner ist. Für die Simulation kann der Öffnungswinkel frei gewählt werden. Abbildung 6.1 zeigt den Kurvenverlauf der Dämpfung bei 2° Öffnungswinkel. Das Link-Budget (siehe Abschnitt 2.5 auf Seite 15) berücksichtigt die Ausrichtung beider Antennen in  $F_A$ . Eine Fehlausrichtung führt zu einer zusätzlichen Dämpfung mit den jeweiligen Anteilen beider Antennen. Das Antennenmodell berücksichtigt diese zusätzliche Dämpfung aus dem Versatz der Antennenausrichtung. Ein Antennenstrahl wird als Kegel modelliert, dessen Breite vom Öffnungswinkel und der Länge abhängig ist.

Die Abstrahlrichtung kann horizontal und vertikal (aus-)gelenkt werden. Die Auflösung der Auslenkung ist von den Möglichkeiten der Ansteuerelektronik abhängig. Das Modell benutzt eine frei konfigurierbare Tabelle für die Strahlkonfigurationen. Die Tabelle beschreibt alle Positionen jeweils für die horizontale und vertikale Ebene. Abbildung 6.2a zeigt ein Szenario mit den Stationen S0 und S1 bei der Nachbarschaftssuche. Die dünnen Linien ausgehend von der jeweiligen Station beschreiben die initiale Ausrichtung. Der grüne Strahl ausgehend von S1 geht *perfekt* durch den Antennenmittelpunkt der Empfangsstation S0. Der rote Strahl von S0 ist nicht auf S1 ausgerichtet, so dass zwischen

## 6. Modellierung und Simulation

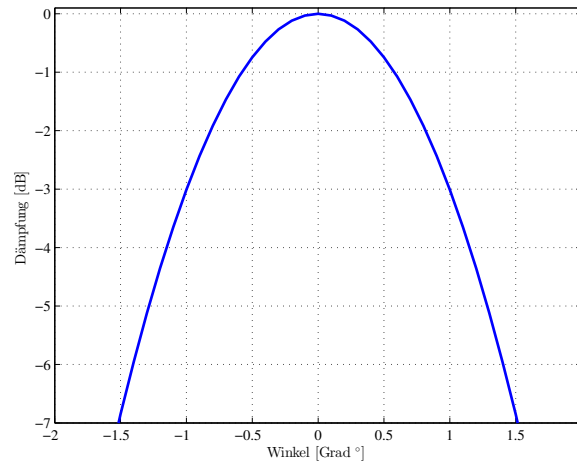


Abbildung 6.1: Dämpfungsverlauf bei 2° Öffnungswinkel

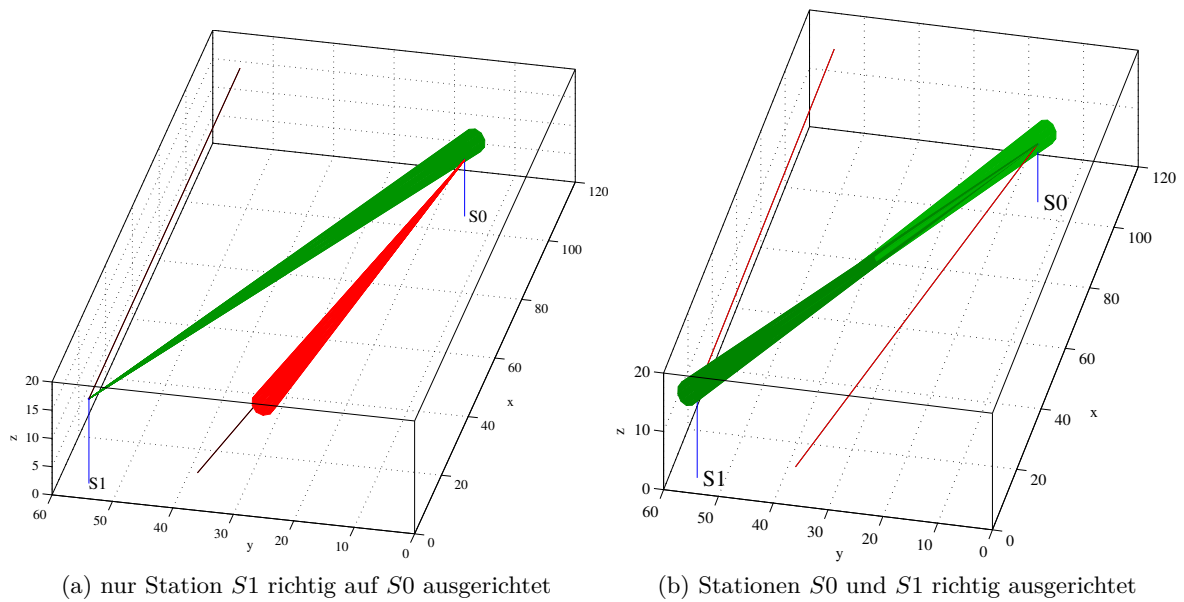


Abbildung 6.2: Antennenstrahlausrichtung

beiden Stationen keine Kommunikation möglich ist. Abbildung 6.2b zeigt dasselbe Szenario mit korrekt ausgerichteten Strahlen, so dass eine Kommunikation möglich ist.

### 6.1.2. Kanaleigenschaften

Das SNR des empfangenen Signals wird über die Positionierung der Stationen im Raum (Entfernung), die Ausrichtung des Antennenstrahls und die Sendeleistung mit Hilfe des Link-Budgets bestimmt. Die zusätzliche Dämpfung durch den Antennenstrahlversatz wird vom SNR abgezogen. Die Fehlerrate der Präambelsynchronisierung sowie die Bitfehlerraten des PHY-Headers und der Daten werden entsprechend dem  $E_b N_0$  basierend auf dem SNR, der Unterträgermodulation und dem Kanalkodierungsverfahren aus simulierten Werten (siehe Abschnitt 2.5 auf Seite 15) ermittelt.

Eine Blockade der Verbindung setzt die BER auf 100%. Eine Blockade kann geometrisch durch die Platzierung eines Blockes innerhalb der Sichtverbindung (siehe Abbildung 6.3)

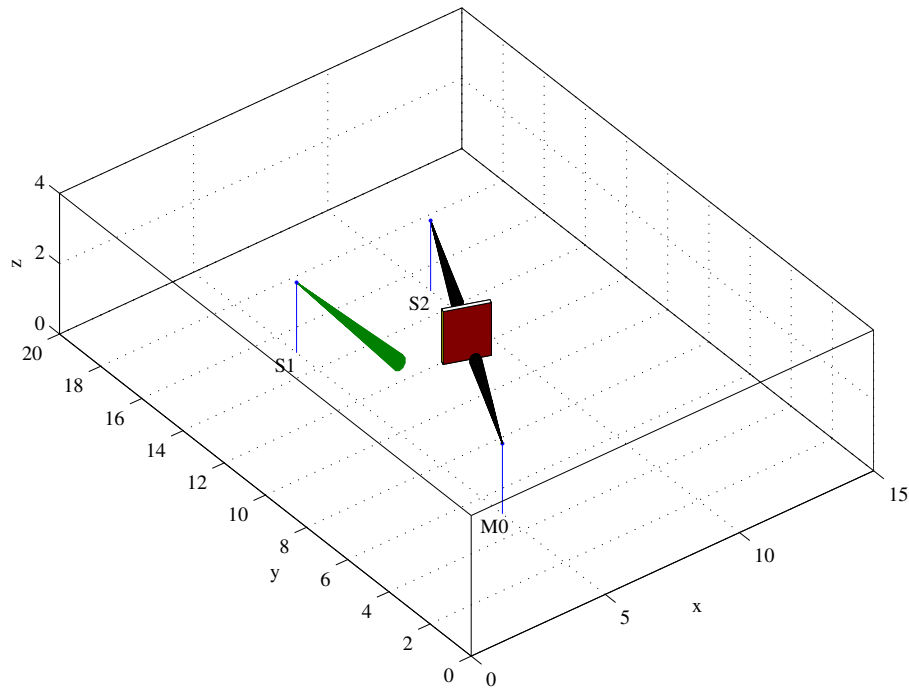


Abbildung 6.3: Blockierte Verbindung

bzw. durch einen Eintrag in die Blockadematrix erzeugt werden. Die Sichtbarkeit bzw. die Wirksamkeit und die Mobilität der Blockade(n) sind parametrisiert und werden automatisch während der Simulation aktualisiert. Eine blockierte Verbindung wird durch verkürzte schwarze Strahlen dargestellt.

Die Laufzeit des Signals wird aus der Entfernung der beiden Stationen berechnet.

### 6.1.3. Zeitverhalten der Komponenten

Die Basisbandverzögerungszeiten werden mit den folgenden Gesamtzeiten abstrahiert:  $T_{TXdel}$ ,  $T_{RXdel}$ . Die Ausgabe des MAC-Headers und der folgenden aggregierten Blöcke erfolgt jeweils als ganzer Block. Das Zeitverhalten der Blockausgabe entspricht der Symbolrate des digitalen OFDM-Basisbandprozessors. Das zu sendende PHY-Frame wird verworfen, wenn ein Fehler bei der Präambelsynchronisierung oder im PHY-Header auftritt. Zusätzlich zu jedem empfangenen Block wird eine Positionsliste der Bitfehler mitgegeben. Enthält diese Liste mindestens eine Bitfehlerposition, so wird der betreffende Block nach dem Empfang verworfen.

## 6.2. Modellierung der Datensicherungsschicht

Die MAC-Protokollsteuerung ist als endlicher Automat konstruiert, welcher die eingehenden Ereignisse prozessiert. Dieser entspricht dem Protokollsteuerautomaten in der Hardwareimplementierung. Die in Abschnitt 5.6.3 auf Seite 91 vorgestellten Paketformate werden auch in der Simulation für die Datenübertragung eingesetzt. Der Automat kann mit den beschriebenen Zuständen und Zustandsübergängen leicht in Hardware portiert werden. Folgende Parameter können z.B. variiert werden:

- Rahmendauer, Dauer der Slots: Beacon-Slot, Beacon-Suchslot, Datenslot, HW-Alg-Slot

## 6. Modellierung und Simulation

- PHY-Datenrate: Unterträgermodulation und Fehlerkorrekturverfahren
- Sendeleistung der Knoten getrennt für jedes Ziel
- Auswahl eines Szenarios: Einlesen der Slotbelegungsmatrizen
- Paketgenerator für jedes Ziel
- Größe der Eingangs- und Ausgangspuffer und Anzahl der Einträge
- Länge des gleitenden Sende- und Empfangsfensters für die Verwaltung der Sequenznummern

### 6.3. Szenarien

Für eine Simulation muß ein Szenario mit einer Anordnung von Stationen definiert werden. Die Abbildungen 6.4a, 6.4b, 6.4c und 6.4d zeigen die in Abschnitt 5.3.3 auf Seite 75 vorgestellten Szenarien. Diese wurden für die weiteren Betrachtungen vorkonfiguriert und werden über globale Simulationsparameter ausgewählt. Es können jederzeit auch andere Szenarien neu erstellt werden. Die verfügbaren Verbindungen werden in der Verbindungsmatrix definiert. Für diese Szenariensimulation erfolgt keine Nachbarschaftssuche. Die Kegel wurden wegen der Übersichtlichkeit nicht überlappend gezeichnet. Rote Kegel symbolisieren unterbrochene respektive noch nicht synchronisierte bzw. konfigurierte Verbindungen an. Grüne Kegel zeigen synchronisierte und konfigurierte Verbindungen an. Hellrote und hellgrüne Kegel markieren einen Master. Graue Kegel zeigen weitere Verbindungsmöglichkeiten des Knoten an.

Mit dem Punkt-zu-Punkt-Szenario in Abbildung 6.4a lassen sich Kabelersatzanwendungen über kurze Distanzen sowie Punkt-zu-Punkt-Backhaul-Richtfunkstrecken über lange Distanzen abbilden. Das Szenario ist optimiert für die schnelle Datenübertragung mit symmetrischen und asymmetrischen Datenraten im Halbduplex-Betrieb.

Abbildung 6.4b zeigt ein Punkt-zu-Mehrpunkt-Szenario im Single-Hop-Betrieb. Jede Slave-Station wird innerhalb des Rahmens mit der gleichen Slotdauer nacheinander angesprochen. Mit den konfigurierten Routing-Tabellen ist außerdem ein Multi-Hop-Betrieb über den Master möglich.

Abbildung 6.4c zeigt das Straßenzugszenario (Daisy-Chain). Abbildung 6.4d zeigt das komplexe Szenario, das auch redundante Pfade zulässt.

### 6.4. Generierung des Netzwerkverkehrs

Der simulierte Netzwerkverkehr basiert auf aufgezeichnete und synthetische Datenströme. Die Paketausgabe wird mit der für den Zielknoten gewählten Datenrate über einen DWRR Paketplaner in den Eingangspuffer des Startknotens eingeschrieben. Das Ziel des jeweiligen Datenstromes wird direkt über ein VLAN-Tag eingestellt. Es stehen ein synthetischer und verschiedene aufgezeichnete Datenströme zur Verfügung, um unterschiedliche Lastfälle und Nutzungen zu simulieren:

- ein voll-synthetischer Datenstrom mit einer definierbaren Datenrate und definierbaren Paketlängen
- ein Live-Mitschnitt einer Videoübertragung mit asymmetrischer Datenrate von ca. 25 MBit/s; 245 unterschiedliche Paketlängen; TX: Pakete mit 1358 Bytes (88%) und 1314 Bytes (11%); RX: Pakete mit 60 Bytes (98%) und Pakete mit 66 Bytes (1%)

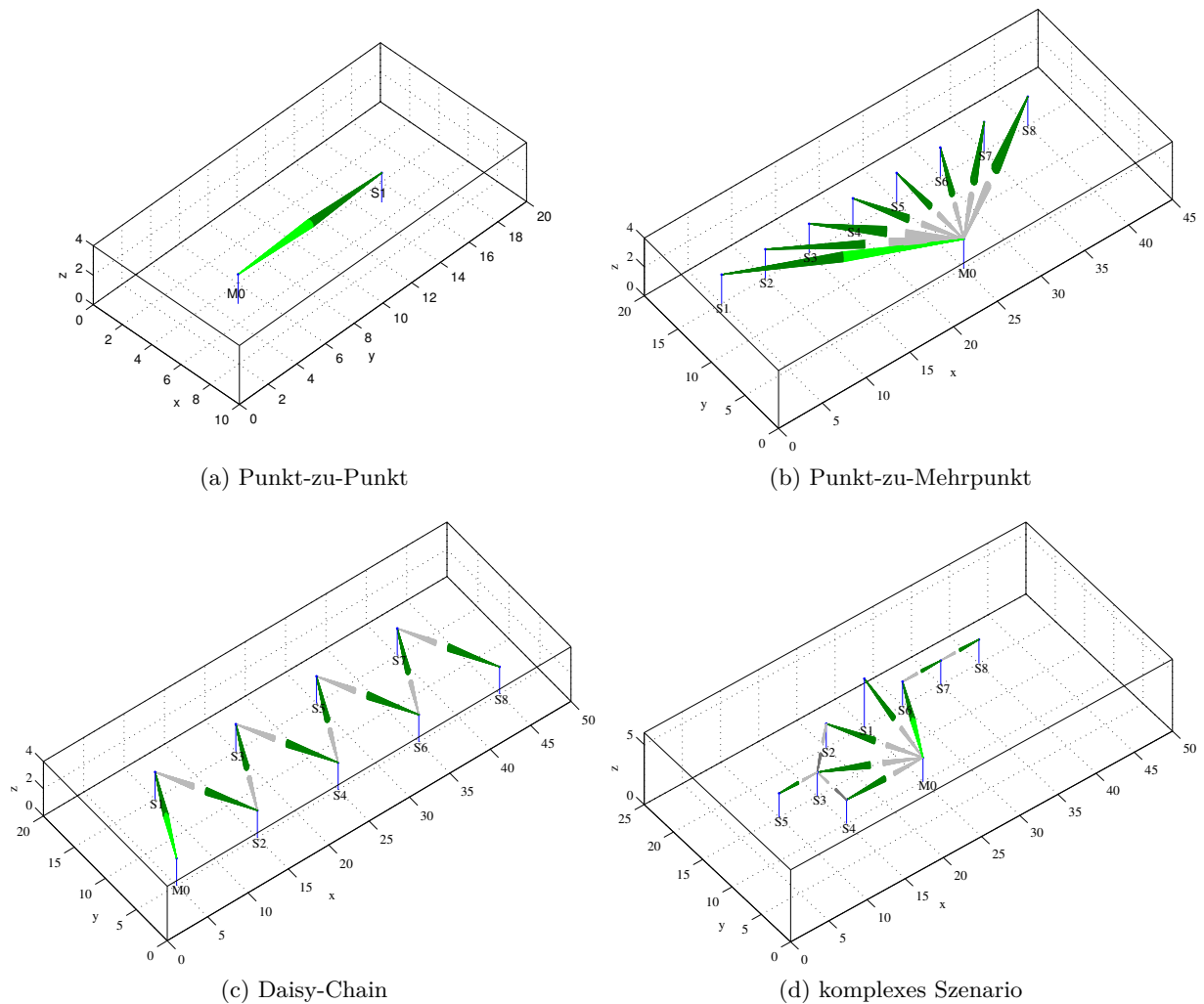


Abbildung 6.4: Beispielszenarien der Systemsimulation

- Live-Mitschnitt einer Kommunikation zweier Multimediasichtgeräte [5] mit asymmetrischer Datenrate von ca. 20 MBit/s; 147 unterschiedliche Paketlängen; TX: Pakete mit 1514 Bytes (99%); RX: Pakete mit 66 Bytes (97%) und Pakete mit 60 Bytes (2%)

## 6.5. Modellierung der Vermittlungsschicht

Die Funktionalität der Vermittlungsschicht wird in der Parametrisierungsphase durch vorberechnete Topologie- und Routingtabelle abgebildet. Eine Ermittlung der Ausrichtung des Antennenstrahls einer *unbekannten* Station ist während des laufenden MAC-Betriebs verfügbar. Die explizite Nachbarschaftssuche nach Abschnitt 5.3.2 auf Seite 69 wird in einer eigenständigen Simulation evaluiert, da in diesem Fall das MAC-Protokoll ausgesetzt werden muß, um exklusiven Zugriff auf den Kanal zu erhalten.

### 6.5.1. Routing

Das Routing wird beim Einstellen der Pakete in die Eingangspuffer durchgeführt. Dabei wird die Zieladresse für den nächsten Slot durch die Slotbelegungsmatrix vorgegeben und

abhängig davon werden für die in der Routingtabelle angegebenen Endknoten Pakete aus den entsprechenden Puffern abgefragt.

### 6.5.2. Nachbarschaftssuche

Die Nachbarschaftssuche innerhalb des laufenden MAC-Protokolls ist als zusätzliches Szenario verfügbar. Dabei sind die Verbindungen (Slotbelegungen) zwischen den Stationen vordefiniert. Die Nachbarschaftssuche dient dabei zur Ermittlung der Antennenstrahlausrichtung der dritten Station im Raum bei der ein Verbindungsaufbau möglich ist.

### 6.6. Resultierende Rohdaten eines Simulationsdurchlaufs

Der Datendurchsatz sowie weitere statistische Parameter werden für jeden Knoten separat aufgezeichnet. Dies erfolgt periodisch in einer globalen Datenstruktur der Simulationsumgebung. Diese Datenstruktur speichert z.B.:

- Verbindungsstatus
- Datendurchsatz mit und ohne Overhead
- Pufferstatus: Füllstand und verworfene Pakete wegen vollem Puffer am Ein- und Ausgang
- Übertragungswiederholungen je Knoten
- Verworfen Pakete durch abgelaufenen TTL-Zähler oder abgelaufenem Übertragungswiederholungszähler
- Fehlerstatistik: Anzahl der fehlerhaften Präambelsynchronisation, PHY-, MAC- und Aggregationsheader, BER/PER
- Anzahl der aggregierten Pakete pro PHY-Frame
- Auslastung des Kanals

Im Rahmen der Simulation kann jedes Paket über mehrere Hops nachverfolgt werden. Dazu werden im Datenteil der Ethernet-Pakete jeweils die Ankunfts- und Ausgangszeiten für die durchwanderten Knoten in einer Liste festgehalten. Damit kann die Verweildauer des Pakets im Knoten und die Gesamtlatenz der Übertragung vom Start bis zum Ziel ermittelt werden. Weiterhin kann so die Funktionalität des MAC-Protokolls hinsichtlich der korrekten Route und der Ankunft des Paketes am Ziel überprüft werden.

### 6.7. Simulationsergebnisse

Eine Auswahl der simulierten Ergebnisse für das Punkt-zu-Punkt- und das Daisy-Chain-Szenario wird in den Abbildungen 6.5 und 6.6 am Ende des Kapitels gezeigt.

Das Abbildung (a) zeigt jeweils den Masterknoten. Die untere Abbildung (b) zeigt den ersten Slave-Knoten.

Das oberste Diagramm zeigt die Anzahl der aktiven Verbindungen zu den Nachbarknoten. Rote Linien markieren eine blockierte Verbindung. Das Zweite zeigt die Datendurchsätze für die gesendeten (rot) und empfangenen (blau) Pakete. Das Dritte zeigt die Latenz der Pakete vom Einstellen in den Puffer bis zur Ausgabe bzw. zum Verwerfen. Ein Punkt wird am Zeitpunkt des Einstellens in den Paketpuffer gesetzt. Die Höhe zeigt die entsprechende Latenz an.

Blaue Punkte markieren erfolgreich übertragene Pakete. Rote Punkte markieren Pakete, die nach dem Empfang nicht in den Eingangspuffer eingestellt werden können und verworfen wurden. Grüne Punkte markieren Pakete, die nicht in den Puffer des Startknotens eingestellt werden können und verworfen wurden. Das letzte Diagramm zeigt den belegten Speicher des Puffers zum Zeitpunkt des Einstellens, des Verwerfens oder der Ausgabe eines Paketes.

Die Simulation des Punkt-zu-Punkt-Szenarios erfolgt mit einer steigenden Eingangspaketdatenrate in Richtung Slave-Knoten 1 und einer konstanten Datenrate von 5 MBit/s in Richtung Knoten 0. Die Verbindung wird alle 200 ms mit einer Dauer von 10 ms blockiert. Die Größe des gleitenden Sendefensters beträgt 64. Die Puffer sind auf eine Größe von 2 MiB pro erreichbarem Nachbarknoten dimensioniert. Abbildung 6.5 zeigt die Simulationsergebnisse für beide Knoten. Der Datendurchsatz geht ab einer Paketdatenrate von 2 GBit/s in Sättigung. Eingehende Pakete aus dem Paketgenerator werden aufgrund des vollen Eingangspuffers im Master-Knoten 0 verworfen. Die Paketlatenzen steigen maximal auf die Dauer der Blockierung.

Die Simulation des Daisy-Chain-Szenarios wird mit einer Paketdatenrate von 50 MBit/s für die Datenströme zu den acht Slave-Knoten und ebenfalls 50 MBit/s in Rückrichtung zum Master durchgeführt. Die Rahmendauer beträgt 4 ms. Die Verbindung wird 200 ms nach dem Start der Simulation für 10 ms blockiert. Abbildung 6.6 zeigt einen Zeitausschnitt der Simulationsergebnisse. Das System benötigt ca. 350 ms, um sich von der Verbindungsunterbrechung zu erholen. Vor der Blockade und nach der Erholungszeit entspricht die maximale Latenz der Rahmendauer, d.h. ein Paket erreicht den Zielknoten innerhalb eines Rahmens über den längsten Weg mit acht Hops.

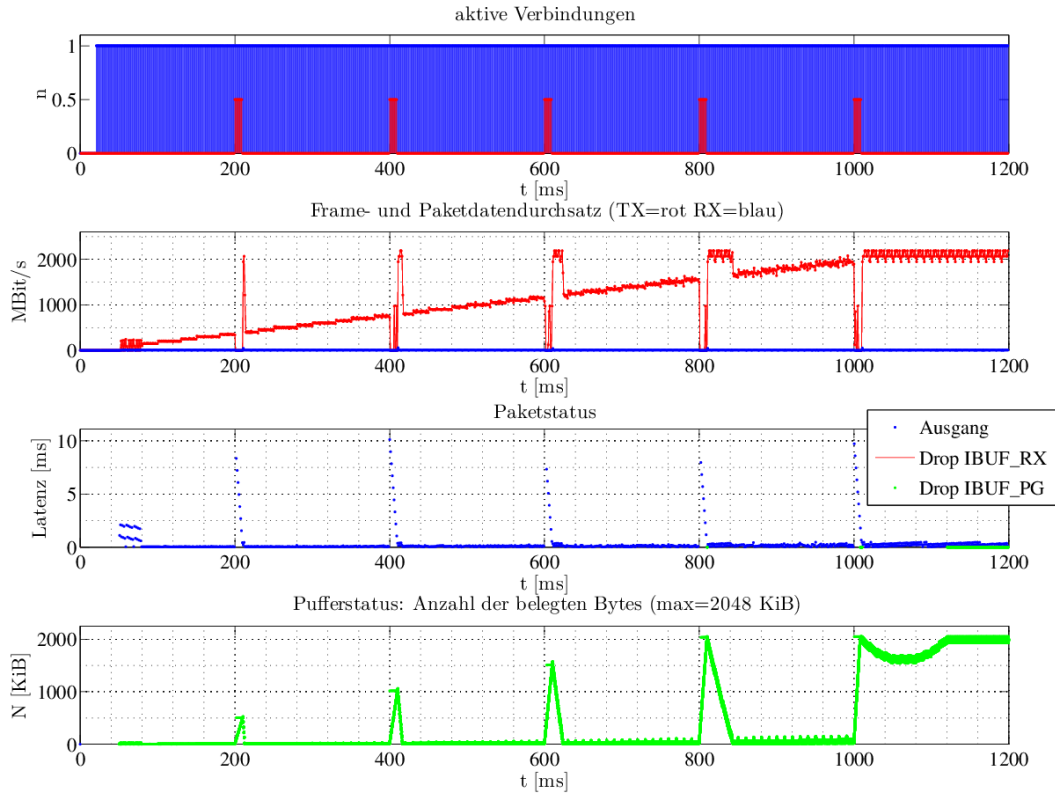
## 6.8. Zusammenfassung

Das erstellte Systemmodell ermöglicht die Simulation der Funktionalität des MAC-Protokolls. Neben der räumlichen Anordnung der Stationen besteht auch die Möglichkeit statische, mobile sowie temporäre Blockaden in den Sichtverbindungen zu platzieren. Damit lässt sich die Robustheit des Protokolls bei statischen und dynamischen Verbindungsblockaden testen. Jede Station kann ihren Antennenstrahl im Raum frei ausrichten. Die Nachbarschaftssuche während des laufenden MAC-Protokolls ermöglicht die Bestimmung der Strahlausrichtung zur Verbindungsherstellung bei *unbekannter* Position einer Station.

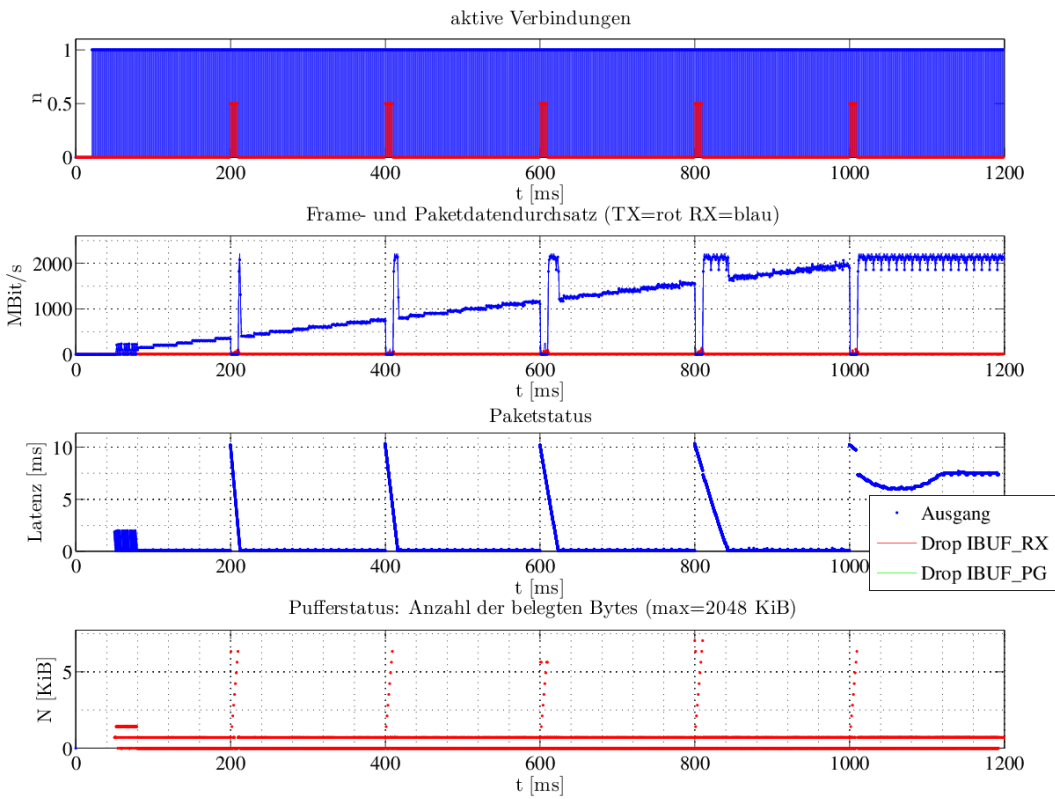
Während der Simulation werden laufend Systemparameter extrahiert und aufgezeichnet. Das ermöglicht die nachträgliche Auswertung des Simulationslaufs, wie z.B. den Verlauf der Pufferauslastung oder das Verhalten beim Verbindungsaufbau. Zusätzlich führt jedes Paket eine Liste der durchwanderten Stationen mit den Eingangs- und Ausgangszeitstempeln. Damit kann die Verweildauer eines Paketes in jeder Station sowie die Gesamtlatenz der Übertragung vom Start bis zum Ziel bestimmt werden.

Mit Hilfe der Simulationen der unterschiedlichen Szenarien wurden die Funktionsweise des MAC-Protokolls und speziell die der Ablaufsteuerung evaluiert. Der Datendurchsatz und die Übertragungslatenz entsprechen den erwarteten Werten.

## 6. Modellierung und Simulation



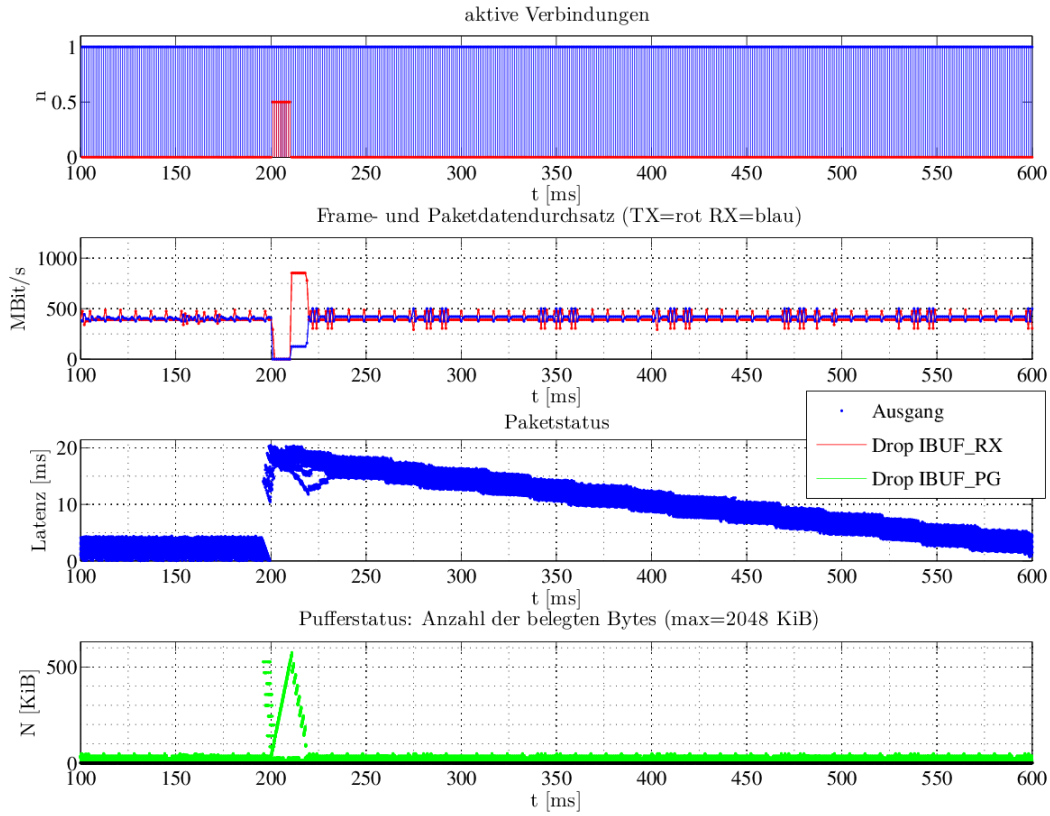
(a) Master-Knoten 0



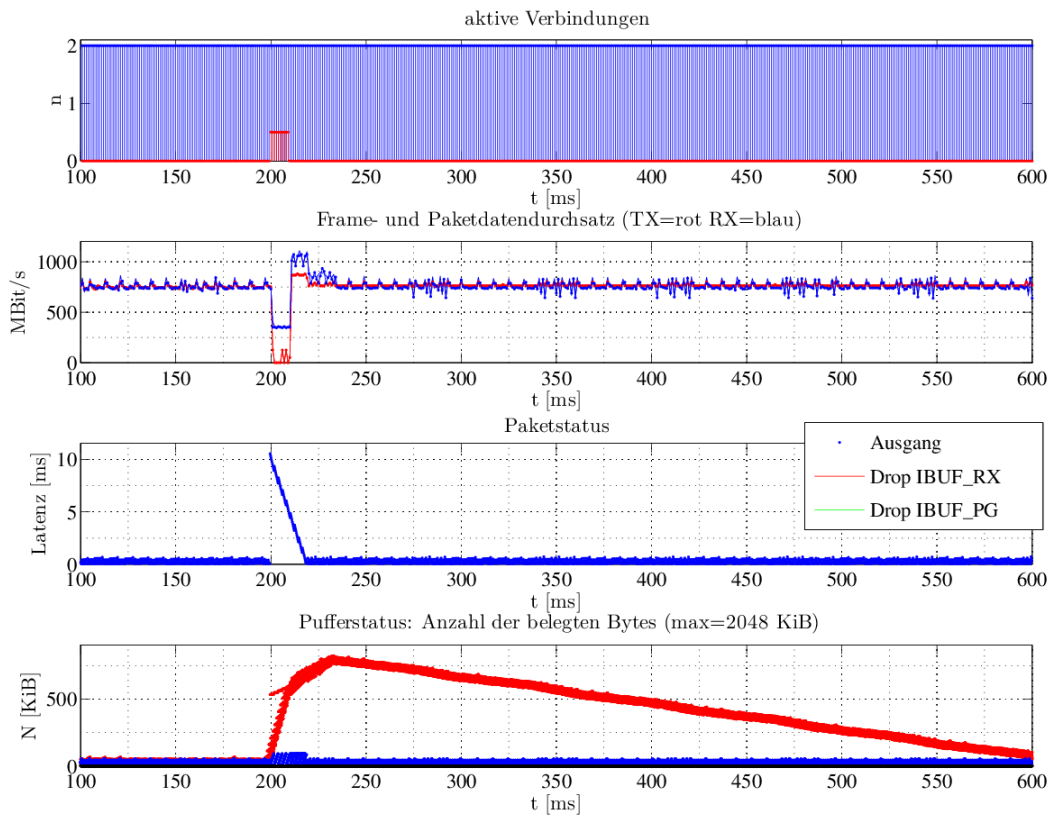
(b) Slave-Knoten 1

Abbildung 6.5: Simulationsergebnisse für das Punkt-zu-Punkt-Szenario mit einer PHY-Datenrate von 2,6 GBit/s





(a) Master-Knoten 0



(b) Slave-Knoten 1

Abbildung 6.6: Simulationsergebnisse für das Daisy-Chain-Szenario mit einer PHY-Datenrate von 2,6 GBit/s



## 7. Hardwareintegrationsaspekte

Während der Mitarbeit des Autors bei den Forschungsprojekten WIGWAM, EASY-A und PRELOCATE sind mehrere Demonstratoren in unterschiedlichen Ausbaustufen entstanden. Diese Projekte beschäftigten sich mit drahtlosen Kommunikationslösungen über kurze Distanzen ( $<10$  m) im 60-GHz-Band bei Datenraten im Gigabit- bzw. Multi-Gigabit-Bereich. Die Demonstratoren werden als Kabelersatzlösung eingesetzt und enthalten jeweils eine auf die Einsatzszenarien der Projekte angepasste MAC-Architektur. Im Folgenden werden zwei Demonstratoren mit ihren Eigenschaften vorgestellt. Anschließend wird ein Konzept für die Hardwarearchitektur des in Kapitel 5 entworfenen MAC-Protokolls vorgestellt.

### 7.1. Gigabit-Demonstrator als Kabelersatzlösung mit redundanter Verbindung

Zielstellung dieses Demonstrators ist die Versorgung der Sitze eines Flugzeuges mit einer robusten drahtlosen Netzwerkverbindung. Diese verbindet ein im Sitz eingebautes Multimediaterminal mit dem Unterhaltungssystem des Flugzeugs. Der Demonstrator wurde neben diversen Laboraufbauten in ein Kabinenmodell eines Flugzeuges (Mockup) integriert und erfolgreich getestet [5]. Abbildung 7.1a zeigt Komponenten des Demonstrators. Anstelle der AFEs mit Vivaldi-Antennen wurden LTCC<sup>84</sup>-Module mit kleineren Ausmaßen eingesetzt. Die AFE-Module der APs wurden verdeckt hinter die Decke eingebaut. Auf jeder Seite der Sitzlehne befindet sich ein AFE dessen Basisbandschnittstellen über analoge Schalter mit dem Transceiver im Sitz verbunden werden. Jedes AFE ist auf einen AP ausgerichtet. Eine zeitliche Synchronisierung der APs über eine Taktleitung ermöglicht den interferenzfreien Zugriff auf das Medium. Jeder AP kann in seinem Zeitslot mit dem Transceiver im Sitz Daten austauschen, d.h. es werden zwei permanente Verbindungen hergestellt. Der Medienserver ist über je eine dedizierte Ethernet-Verbindung mit jedem AP verbunden und fragt periodisch den Verbindungsstatus ab. Die Datenübertragung wird nur über eine dieser Verbindungen geführt. Wird die aktive Verbindung unterbrochen, so leitet der Server die Daten zukünftig über den anderen AP mit der aktiven Verbindung.

Abbildung 7.1b zeigt einen Transceiver (ohne AFE) mit den analogen Schaltern der Basisband-AFE-Schnittstelle auf der rechten Seite, einer Statusanzeige links unten und der Ethernet-Schnittstelle links oben. Darunter befinden sich die FPGA-Hardwareplattformen für den Basisbandprozessor und den MAC. Der Basisbandprozessor benutzt eine Bandbreite von ca. 333 MHz und erlaubt PHY-Datenraten zwischen 0,12 und 1,08 GBit/s [72–74]. Der komplette Transceiver wird im Sitz und in den zwei Access-Points (APs) eingesetzt.

#### 7.1.1. MAC-Architektur

Abbildung 7.2 zeigt eine Übersicht der MAC-Hardwarearchitektur. Der zusätzlich integrierte Ethernet-Switch ist nicht dargestellt. Im Mockup-Szenario sind von einer Station jeweils maximal zwei Zielstationen erreichbar, so dass die Pufferkomponenten für den Sende- und Empfangspfad zweifach ausgeführt wurden. Die Aggregation der Pakete wird durch die Pufferkomponenten im Sendepfad durchgeführt. Da kein Multi-Hop notwendig ist, können alle Pakete für das gleiche Ziel mit nur einem zusätzlichen Längenheader von vier Bytes aggregiert werden. Die Aggregation erfolgt innerhalb der Pufferstruktur. Die Puffer bestehen aus einer konfigurierbaren Anzahl von Teilpuffern mit einer Größe von

<sup>84</sup>LTCC - Low Temperature Cofired Ceramics

## 7. Hardwareintegrationsaspekte

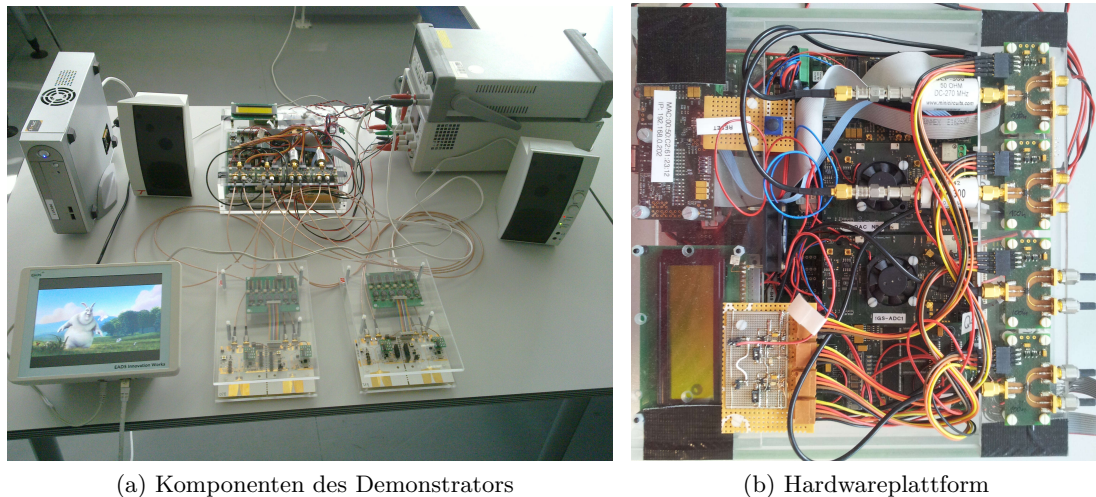


Abbildung 7.1: Gigabit-Demonstrator mit redundanter Verbindung

6144 Bytes. Eingehende Ethernet-Pakete werden in ein einzelnes Paket mit der maximalen Größe eines Teilpuffers aggregiert. Die Aggregation wird nach einer festgelegten Zeit abgebrochen, um das aggregierte Paket für die Übertragung verfügbar zu machen, falls nicht schnell genug Pakete ankommen. Damit lassen sich die Übertragungslatenzen begrenzen. Während ein Paket ausgegeben oder während auf eine Bestätigung gewartet wird, können in den noch freien Teilpuffern bereits neue Pakete aggregiert werden.

Der auf TDMA und polling-basierende Medienzugriff erwartet ein Imm(ediate)-ACK mit oder ohne zusätzliche Daten (siehe Abschnitt 3.2.4 auf Seite 28) auf ein gesendetes und ggf. aggregiertes Paket. Die eingesetzte Pufferstruktur erlaubt keine selektive Neuübertragung. Allerdings wird durch das Imm-ACK automatisch die richtige Ausgabereihenfolge der Pakete hergestellt, da der nächste Block erst nach der Bestätigung des alten Blockes gesendet wird. Der Verlust eines (aggregierten) Paketes erfordert eine vollständige Neuübertragung des aggregierten Paketes.

Die Ethernet-Switch-Komponente mit vier Ports (siehe Abschnitt 7.4.1) beinhaltet eine Speicherschnittstelle über das IP-basierte UDP, um den MAC zu konfigurieren bzw. den Status abzufragen. Die Weiterleitung der Pakete an den richtigen Ethernet- bzw. drahtlosen Port erfolgt durch das Lernen der dem Port zugehörigen MAC-Adressen der Ethernet-Pakete.

### 7.1.2. MAC-Performanz

Die im Demonstrator eingesetzte PHY-Datenrate beträgt 240 MBit/s. Eine Aggregation auf eine Paketlänge von 6144 Bytes ermöglicht einen maximalen Datendurchsatz von 200 MBit/s in einer Richtung (Formeln siehe Abschnitt 4.3). Das TDMA-Verfahren zwischen den beiden APs halbiert diesen Datendurchsatz. Zuzüglich des erhöhten Overheads stehen bei gleichem Up- und Downloadverhältnis maximal 50 MBit/s pro Richtung und Terminal zur Verfügung.

### 7.1. Gigabit-Demonstrator als Kabelersatzlösung mit redundanter Verbindung

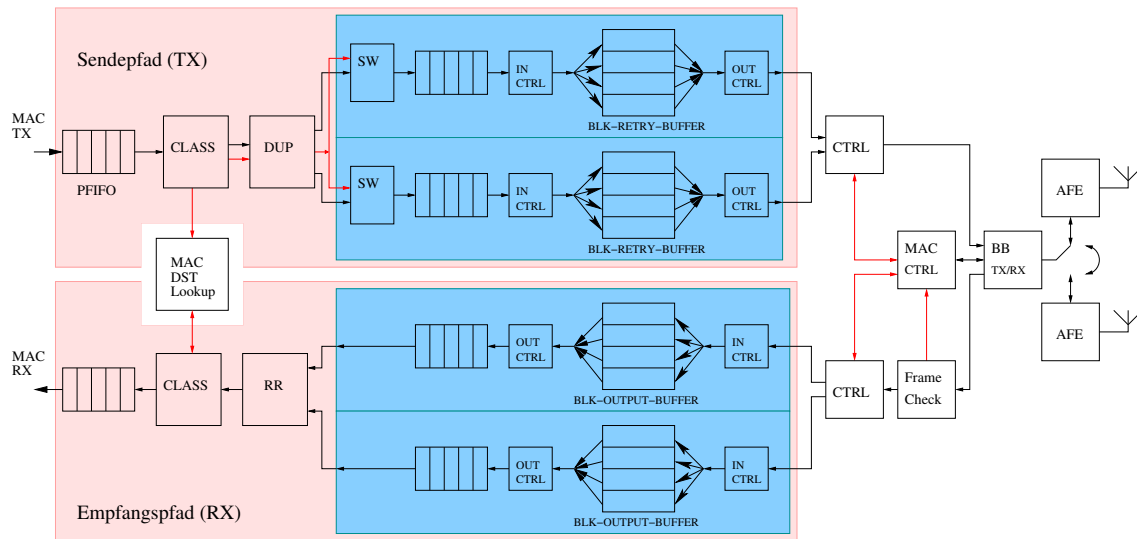


Abbildung 7.2: MAC-Systemübersicht Gigabit-Demonstrator

Tabelle 7.1: FPGA-Ressourcenverbrauch Gigabit-Demonstrator

Modul	FPGA Xilinx Virtex	FF		LUT		BRAM		MUL	
			[%]		[%]		[%]		[%]
BB-TX	XV 2 PRO 100	17235	19	19609	22	111	25	33	7
BB-RX	XV 2 PRO 100	64076	71	89542	101	345	75	199	44
MAC (Sitz)	XV 4 FX 60	23254	45	31985	63	231	99	8	6
MAC (AP)	XV 4 FX 100	23691	28	33390	39	284	75	8	5

### 7.1.3. System-Performanz

Die Performanz des kompletten Systems bestehend aus dem Medienserver, dem Nutzerterminal und dem drahtlosen Kommunikationssystem wurde während eines Tests im Mockup überprüft. Dabei wurde die zuverlässige Funktionsweise des Medienservers und des Nutzerterminals im Sitz bei dynamischen Verbindungsblockaden untersucht. Ein Wechsel der aktiven Verbindung bei einer Blockierung zeigte keine negativen Auswirkungen auf das Funktionsverhalten aller Komponenten. Der verfügbare Datendurchsatz erlaubte eine verzögerungsfreie Bedienung des Terminals und das tadellose Streaming der Medieninhalte.

#### 7.1.4. FPGA-Integration und Ressourcenverbrauch

Die Funktionalität des Medienzugriffsprotokolls wurde komplett in eine FPGA-Hardware integriert. Der FPGA-interne lokale Speicher lässt sich ideal für die Puffer einsetzen, jedoch ist die Größe sehr begrenzt und er eignet sich daher vor allem in Systemen mit niedrigen Übertragungslatenzen und wenig Übertragungswiederholungen. Der MAC wird mit 62,5 MHz getaktet. Das erlaubt eine interne Datenrate von 2 GBit/s bei einem 32-Bit breiten Datenbus.

Tabelle 7.1 zeigt den Ressourcenverbrauch der FPGA-Integration für den Basisbandprozessor, den MAC der Sitzterminals und den MAC der APs. Die Prozentangaben beziehen sich auf die verfügbaren Ressourcen des entsprechenden FPGAs. Die zusätzlichen Speicherressourcen im größeren FPGA wurden für die Integration eines größeren Eingangspuffers genutzt.

Tabelle 7.2: FPGA-Ressourcenverbrauch Multi-Gigabit-Demonstrator

Modul	FPGA	FF	[%]	LUT	[%]	BRAM	[%]	DSP48E	[%]
Loc-Alg	XV 5 SX95	13252	23	15377	26	49	10	43	7
BB-TX	XV 5 SX95	39649	67	35530	60	133	27	286	45
BB-RX	XV 5 LX330	60691	29	100611	49	305	47	51	27
	XV 5 SX240	64165	42	86170	57	138	13	593	56
MAC	XV 5 FX200	32406	26	33447	27	329	72	9	2

## 7.2. Multi-Gigabit-Demonstrator als Kabelersatzlösung für eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung

Mit Hilfe einer drahtlosen Punkt-zu-Punkt-Verbindung wird ein Gigabit-Ethernet-Kabel ersetzt. Das erhöht z.B. in industriellen Umgebungen die Robustheit der Datenübertragung durch den Wegfall von Kabelverlegungen an beweglichen Teilen. Weiterhin erfolgt eine Reduzierung des Gewichtes z.B. im Flugzeug.

Für die Integration des Demonstrators standen leistungsfähigere FPGA-Plattformen und ein OFDM-Basisbandprozessor [49, 50] mit höheren Datenraten als für den ersten Demonstrator zur Verfügung. Die Ergebnisse zum MAC-Design wurden durch den Autor dieser Arbeit in [1, 2, 4] veröffentlicht und werden in den folgenden Absätzen noch einmal zusammengefaßt.

Abbildung 7.3a zeigt das Gehäuse des Demonstrators zusammen mit einem analogen Frontend (AFE) für das 60-GHz-Band. Abbildung 7.3b zeigt das Innenleben des Gehäuses: eine FPGA-Plattform für die Integration des digitalen Basisbandprozessors und eine weitere für die Integration der Medienzugriffssteuerung. Beide FPGA-Plattformen kommunizieren über serielle bidirektionale Multi-Gigabit Hochleistungsverbindungen (Rocket-IO). Externe Geräte des Netzwerkes (Kabelersatzendpunkte) werden über eine Gigabit-Ethernet-Schnittstelle mit dem System verbunden. Eine Anzeige informiert über den aktuellen Zustand des Systems und den Status der drahtlosen Verbindung. Tabelle 7.2 zeigt die benötigten FPGA-Ressourcen des Übertragungssystems.

Für den Aufbau einer drahtlosen Punkt-zu-Punkt-Verbindung werden zwei Stationen benötigt. Der erreichbare Datendurchsatz liegt bei 1 GBit/s. Das System arbeitet im Halbduplex-Modus, so dass der maximale Datendurchsatz nur in einem Szenario mit asymmetrischen Datendurchsätzen erreicht werden kann. Ein solches Szenario ist z.B. die industrielle Bildverarbeitung (Machine Vision) bei der eine Kamera Videodaten drahtlos an das Verarbeitungssystem (Machine Vision Host) überträgt. Die Leistungsfähigkeit des Systems wurde in einer realen Umgebung überprüft.

Zusätzlich bietet das System eine Anwendungsschnittstelle, mit der über die AD-/DA-Wandler auf den Übertragungskanal zugegriffen werden kann. Im aufgebauten System kann damit die Entfernung der Stationen während der Datenübertragung gemessen werden.

### 7.2.1. MAC-Architektur

Im Punkt-zu-Punkt-Szenario wird eine Verbindung zwischen zwei Stationen aufgebaut. Die Abbildung 7.4 zeigt eine Übersicht der MAC-Architektur. Im Unterschied zu Abbildung 7.2 sind die Pufferstrukturen für den Sende- und Empfangspfad nur einmal vorhanden, da jeweils nur die andere Station in Frage kommt. Da eine größere PHY-Datenrate zu



## 7.2. Multi-Gigabit-Demonstrator als Kabelersatzlösung für eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung

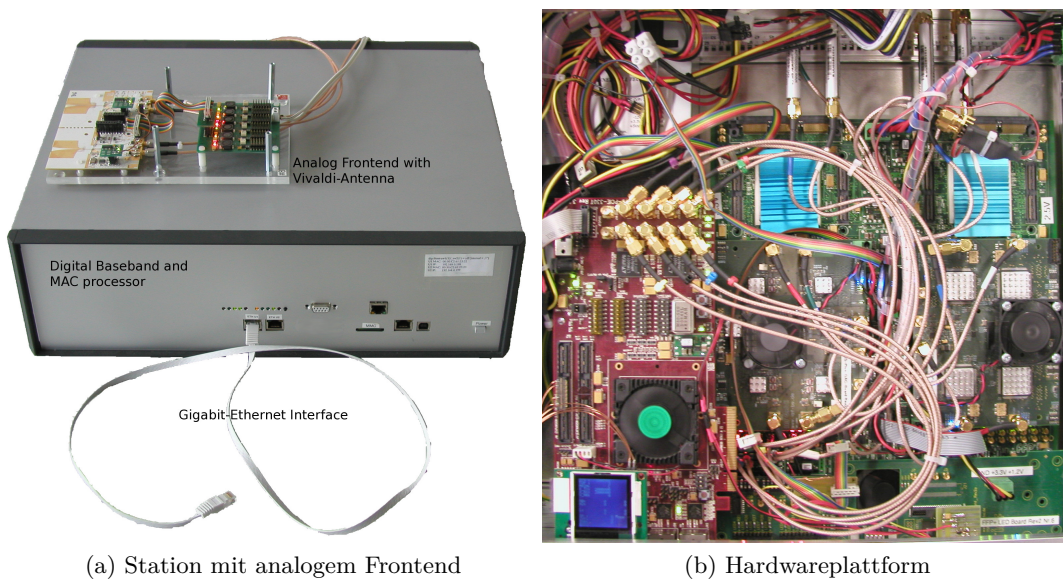


Abbildung 7.3: Multi-Gigabit-Demonstrator für Kabelersatzlösungen über eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung

Verfügung steht, wurde die Anzahl der Teilpuffer auf acht und die Länge der Teilpuffer auf 16384 Bytes erhöht.

Wie in der vorigen MAC-Architektur benutzt das Aggregierungsverfahren einen vier Byte langen Header. Zusätzlich zur Aggregation auf der MAC-Ebene können bis zu acht PHY-Frames hintereinander ohne Bestätigung gesendet werden. Geht ein Paket verloren, so wird dieses nach einer ausbleibenden Bestätigung als erstes PHY-Frame der nächsten PHY-Frame-Sequenz gesendet. Die Ausgabe der Pakete im Empfänger erfolgt in der gleichen Reihenfolge wie die Eingabe im Sender. Die Reihenfolgewiederherstellung wird über Sequenznummern und ein gleitendes Fenster gesteuert. Dieses Verfahren wird auch in der vorgeschlagenen MAC-Architektur eingesetzt (siehe Abschnitt 7.4.2 auf Seite 124).

Die Übermittlung des Empfangspufferstatus verhindert, dass Pakete bei vollem Empfangspuffer verworfen werden müssen. Der Ausgabepuffer füllt sich, falls ein Paket verloren geht und Pakete mit höherer Sequenznummer deshalb nicht ausgegeben werden können. Pakete, die nicht in den Puffer eingestellt werden können, werden nicht bestätigt. Reicht die empfangene Sequenznummer über das aktuelle Fensterende des Empfangspuffers, wird das Fenster nachjustiert und alle Pakete, die aus dem Fenster herausfallen, werden ausgegeben. Das tritt z.B. dann auf, wenn ein Paket im Sender verworfen wird, weil der Übertragungswiederholungszähler abgelaufen ist. Ein Paket mit einer Sequenznummer kleiner als der Start des Empfangsfensters wird verworfen. Weiterhin werden Paketduplikate verworfen noch bevor sie den Ausgabepuffer erreichen.

Alle wichtigen MAC-Einstellungen und statistische Laufzeitinformationen werden in einer Registerbank gespeichert und sind wie im ersten Demonstrator über eine Schnittstelle erreichbar.

### 7.2.2. Messung der Paketfehlerraten des Kommunikationssystems

Das System ermöglicht eine komfortable Messung der PER über einen im digitalen Basisbandprozessor eingebauten Paketgenerator mit einer entsprechenden Auswerteeinheit. Über die Speicherschnittstelle kann der Paketgenerator gesteuert werden und entspre-

## 7. Hardwareintegrationsaspekte

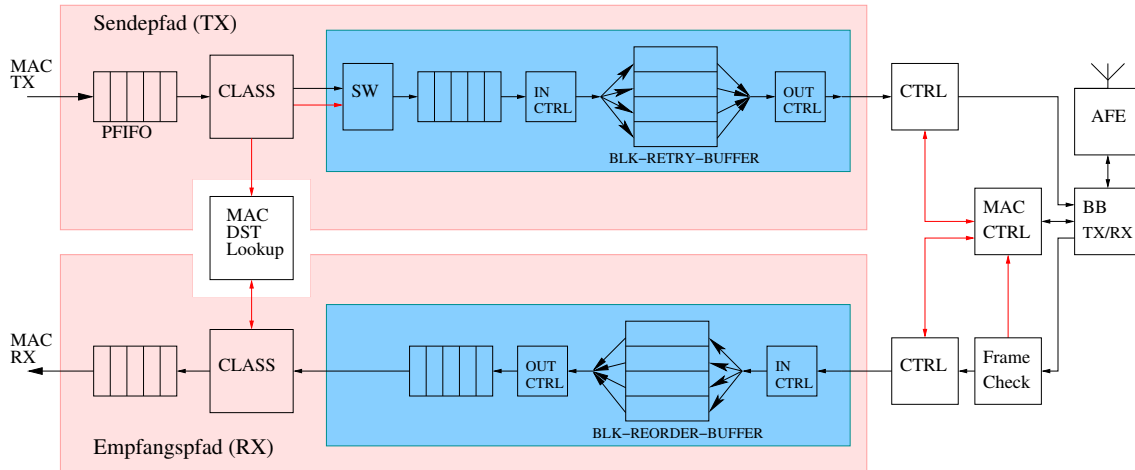


Abbildung 7.4: MAC-Systemübersicht Multi-Gigabit-Demonstrator

Tabelle 7.3: Meßparameter

60-GHz-AFE	0.25 $\mu$ m SiGe Chipsatz + Vivaldi-Antenne			
Modulation und FEC	QPSK	$R=1/2$	DR=1,3 GBit/s	mit/ohne RS
	16-QAM	$R=2/3$	DR=2,6 GBit/s	mit RS
Entfernung	1 ... 20 m			
Anzahl der PHY-Frames	$> 10^6$			
Paketlängen	2, 4, 8, 16 KiB			

chend im Empfänger die Ergebnisse der Messung abgefragt werden. Für die Messung wurden zwei Stationen jeweils auf einem beweglichen Tisch befestigt, um die Entfernung verändern zu können. Der Paketgenerator erzeugt Pakete mit einer festgelegten Länge und PHY-Datenrate sowie mit einer laufenden Paketnummer und einer CRC über den Paketinhalt. Die laufende Paketnummer erlaubt die Feststellung von verlorengegangenen Paketen durch eine fehlerhafte Präambelsynchronisation oder einen fehlerhaften PHY-Header. Die Paketfehlerrate (PER) wird nur über die korrekt empfangenen PHY-Frames berechnet. Die Frame Error Rate (FER) beinhaltet zusätzlich die verlorengegangenen Pakete. Die Messung mit dem Paketgenerator hat den Vorteil, dass die Pakete mit der gleichen Länge und ohne weiteren MAC-Overhead (MAC-Header, CRC) direkt übertragen werden.

Tabelle 7.3 zeigt eine Übersicht der Meßparameter. Es wurden mindestens  $10^6$  PHY-Frames übertragen. Die Messung wurde bei einer Fehlerrate größer als 10% abgebrochen. Abbildung 7.5 zeigt die Ergebnisse für eine PHY-Datenrate von 1,3 GBit/s und Paketlängen von 2 und 16 KiB (mehr im Anhang C.1 auf Seite 171). Bei großen Entfernungen zeigen sich die Einflüsse der Mehrwegeausbreitung. Die Messungen zeigen eine erfolgreiche Datenübertragung bei Distanzen bis zu 19 m mit Paketlängen von 2 KiB und bis zu 17 m bei Paketlängen von 16 KiB. Der Entfernungsgewinn mit zusätzlicher RS-Kodierung liegt für eine PER von 10% bei 6 m.

### 7.2.3. Messung der MAC-Performanz mit einer HD-Industriekamera

Die Performanz des Gesamtsystems wurde mit einer industriellen HD-Videokamera als Paketsender ermittelt. Die Kamera ist über die Gigabit-Ethernet-Schnittstelle mit dem Kom-



## 7.2. Multi-Gigabit-Demonstrator als Kabelersatzlösung für eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung

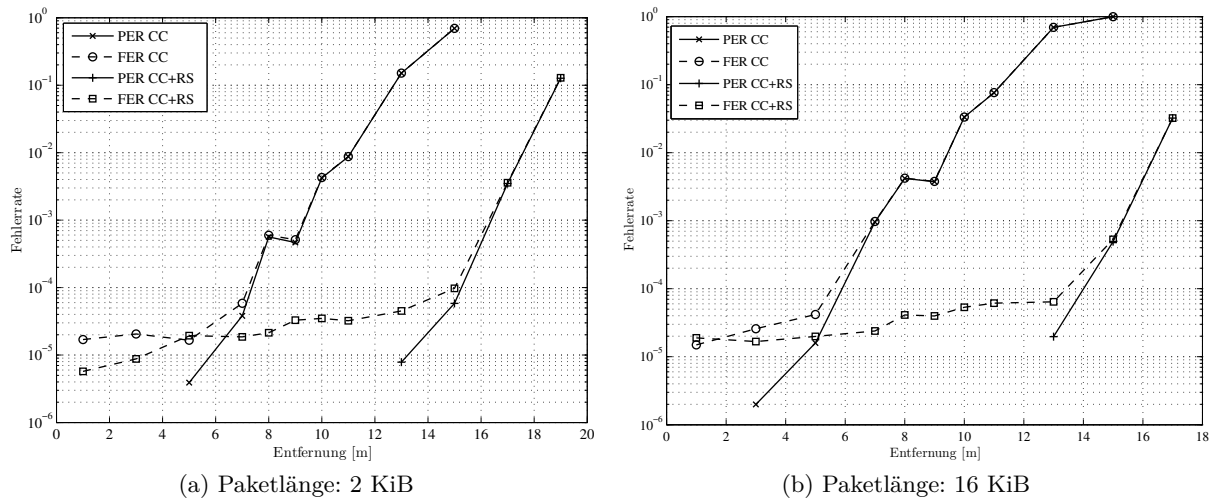


Abbildung 7.5: Frame- und Paketfehlerrate in Abhängigkeit von der Entfernung bei einer PHY-Datenrate von 1,3 GBit/s

munikationssystem verbunden. Die Kamera hat eine Auflösung von  $1292 \times 960$  Bildpunkten mit je 24 Bit RGB-Farbinformation. Die Bilddatenausgabe über die Ethernet-Schnittstelle benötigt ungefähr 31 ms. Die Kamera puffert bis zu sieben Bilder, da ein ARQ für nicht bestätigte Bilder bzw. Bildfragmente unterstützt wird. Die Kameraparameter wurden wie folgt konfiguriert:  $1292 \times 960$  Bildpunkte, 24 Bit RGB, Ethernet-Paketlänge 1460 Bytes, keine Wartezeit zwischen den Ethernet-Paketen, kontinuierliche Aufnahme, Belichtungszeit  $< 31 \text{ ms}$  für eine maximale Datenrate.

Die Demonstratoren wurden für die Messung in 8 m Entfernung positioniert. Die PHY-Datenrate beträgt 1,3 GBit/s. Während der Messung wurden die Statistikdaten des MAC aufgezeichnet. Gleichzeitig erfolgte die Wiedergabe des Videodatenstromes mit einer Software des Kameraherstellers. Diese zeigt die Statistik der Bildpaketdaten an, wie z.B. verlorene Fragmente und Fragmentwiederholungen des ARQ-Mechanismus. Damit kann direkt überprüft werden, ob die Übertragung der Videodaten ohne Paketverluste und ohne Paketwiederholungen erfolgt.

Die Kamerasoftware zeigt einen maximalen Datendurchsatz von 937 MBit/s. Es gingen keine Pakete verloren und es wurden auch keine wiederholt. Das MAC-Statistikmodul gab dazu im Schnitt 7880 korrekt empfangene Pakete pro Sekunde und 60 fehlerhafte Pakete pro Sekunde bei einem Datendurchsatz von 983 MBit/s an. Der höhere Datendurchsatz resultiert aus dem zusätzlichen Protokolloverhead und den Übertragungswiederholungen der fehlerhaften Pakete. Die Kanalauslastung beträgt 82,5% im Downlink und 4,5% im Uplink. Die mittlere aggregierte MAC-Paketlänge (MPDU) beträgt 15590 Bytes. Die daraus folgende Frame- und Bitfehlerrate ist  $FER = \frac{60}{7880} = 7.6 \times 10^{-3}$  und  $BER = 6.13 \times 10^{-8}$ . Die Messung erfolgte in einer anderen Umgebung als die Messung mit dem Paketgenerator.

### 7.2.4. Anwendungsschnittstelle für den direkten und exklusiven Zugriff auf den Übertragungskanal

Zusätzlich zu den herkömmlichen MAC-Funktionen ermöglicht eine Anwendungsschnittstelle den exklusiven Zugriff auf den Übertragungskanal durch eine oder mehrere Anwendungen über ein Hardwaremodul (siehe Abschnitt 5.5.3 auf Seite 88). Abbildung 7.6 auf der nächsten Seite zeigt die Einbindung der Schnittstelle und des Hardwaremoduls in die

## 7. Hardwareintegrationsaspekte

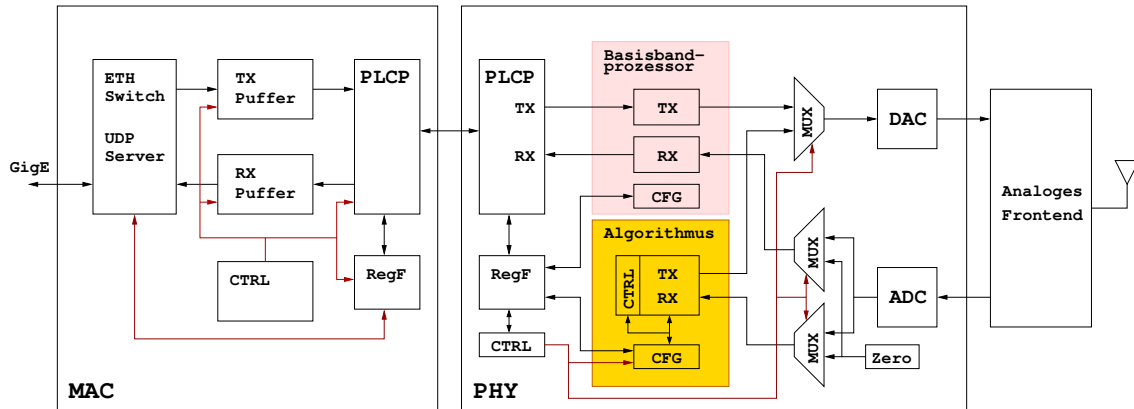


Abbildung 7.6: Hardwarestrukturübersicht der MAC- und der PHY-Schicht mit zusätzlicher Hardwarefunktionalität

MAC- und der PHY-Struktur. MAC und PHY sind über die PLCP-Schnittstelle verbunden. Der Zugriff auf die Konfiguration und den Status des BB- und des Hardwaremoduls erfolgt über einen Registerbereich, der durch den MAC über die PLCP-Schnittstelle beschrieben und gelesen werden kann. Die Umschaltung der AD-/DA-Wandler zwischen dem Basisbandprozessor und dem Hardwaremodul erfolgt durch ein separates Steuermodul, das mit der Registerbank **RegF** verbunden ist. Mit dem Startsignal werden die AD-/DA-Wandler auf das Schnittstellenmodul für eine spezifizierte Dauer umgeschaltet. Nach dem Ablauf der Zeit wird wieder auf den Basisbandprozessor zurückgeschaltet.

Im Demonstrator wurde ein Algorithmus zur Entfernungsmessung per RTToF in ein Hardwaremodul integriert. Durch den direkten Zugriff auf den Kanal stehen 2 GHz Bandbreite für die Entfernungsmessung zur Verfügung. Dadurch wird eine sehr hohe Auflösung im einstelligen Zentimeterbereich erreicht [1]. Es wurden 20 Messungen pro Sekunde durchgeführt. Der HW-Alg-Slot dauert 80  $\mu$ s und folgt gleich nach dem Beacon-Slot. Die Dauer der Messungen nimmt 0,02% der Gesamtzeit in Anspruch. Der Datendurchsatz des Systems wird dadurch nicht merklich beeinträchtigt.

Die Abtastfrequenz der AD-/DA-Wandler beträgt 2,16 GHz. Die Taktfrequenz des Hardwaremoduls zu den AD-/DA-Wandlern (MUX) beträgt 270 MHz. Die AD-/DA-Wandlerschnittstelle liefert bzw. erwartet acht Abtastwerte pro Taktzyklus.

Der MAC unterstützt die Auswahl mehrerer Hardwaremodule. Eine Lösung zur Einsparung der Ressourcen von nicht zeitgleich benötigten Hardwaremodulen ist die partielle Rekonfiguration der Hardwaremodule zur Laufzeit. Vor der Ausführung muß der ausgewählte Algorithmus in den FPGA geladen werden. Der minimale Abstand zwischen der Ausführung eines Hardwaremoduls ist dann von der Rekonfigurationszeit der FPGA-Ressourcen des Hardwaremoduls abhängig. Die notwendige einheitliche Schnittstelle besteht aus der AD-/DA-Wandlerschnittstelle und dem Registerbereich für die Konfigurationsparameter und die Ergebnisse. Die Größe des Registerbereichs muß entsprechend der Größe der Konfigurationsparameter und der Ergebnisse angepaßt werden. Sollen viele Daten übertragen werden, so reduziert sich der Datendurchsatz des Kommunikationssystems, da alle Daten zwischen PHY (BB- & HW-Modul) und MAC über die PLCP-Schnittstelle übertragen werden müssen.

### 7.3. Evaluation der Hardwareumsetzungen

In diesem Abschnitt werden die Besonderheiten der Demonstratoren erläutert und die Auswirkungen auf die neu vorgeschlagene MAC-Architektur diskutiert.

Die Demonstratoren wurden speziell für die entsprechenden Einsatzszenarien der Projekte entwickelt und im realen Umfeld getestet sowie relevante Leistungsparameter gemessen.

Der erste Demonstrator stellt über TDMA zwei redundante Verbindungen zwischen einem Terminal und zwei Access Points (AP) her. Der Bruttodatendurchsatz pro Richtung beträgt maximal ein Viertel der PHY-Datenrate. Die Sende- und Empfangspufferstruktur wurde für jedes Ziel separat implementiert (generisch dupliziert).

Der zweite Demonstrator für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen ist für die hochratige Datenübertragung mit niedrigen Übertragungslatenzen ausgelegt. In jeder Station ist je ein Sende- und Empfangspuffer integriert, da nur die jeweils andere Station Kommunikationspartner ist.

#### 7.3.1. Synchronisierung der Stationen

Problematisch erwies sich die Taktdrift zwischen den APs des ersten Demonstrators. Beide APs greifen jeweils abwechselnd auf das Terminal zu. Aufgrund der Taktdrift verschiebt sich der Zugriffszeitpunkt bei beiden Stationen abhängig vom Frequenzunterschied der Taktgeneratoren der APs. Die eingesetzten Quartzgeneratoren haben einen maximalen Frequenzfehler von 20 ppm, d.h. nach einer Sekunde weichen die Zugriffszeitpunkte um  $\pm 20 \mu\text{s}$  voneinander ab.

Eine Synchronisierung der beiden APs kann durch Synchronisationsimpulse erfolgen, wobei ein AP die Impulse über eine Kabelverbindung bereitstellt und der andere AP seine Zeitbasis nach diesen Impulsen nachjustiert. Eine weitere Möglichkeit ist die Bereitstellung eines zentralen Taktes mit dem SyncE-Standard. Hierbei wird der Datentakt des Ethernet-Kabels für die Taktsynchronisierung genutzt. Dabei müssen die Ethernet-Ports der Multimediaserver SyncE unterstützen und können dann den gleichen Datentakt an beide APs übertragen. Eine dritte Möglichkeit besteht durch das paketbasierte Synchronisationsverfahren nach dem IEEE-Standard 1588. Dabei werden Pakete mit einem Zeitstempel zwischen dem Uhren-Master und den APs versendet. Diese können daraus die Zeitdifferenz zwischen dem Master und der eigenen Zeit ermitteln und die eigenen Uhren oder auch die Takte nachjustieren. Weitere Ausführungen finden sich in Abschnitt 7.4.4.2 auf Seite 135.

Im Demonstrator wird die Zeit über eine direkte Kabelverbindung zwischen den APs synchronisiert. Damit ist garantiert, dass beide Aps im richtigen Zeitraster auf das Terminal zugreifen. Dieses schaltet die AFEs nach dem Erhalt eines Beacons von einem der APs abwechselnd zwischen den APs hin und her. Es kann nur dann eine Kommunikation erfolgen, wenn ein AP innerhalb der Zeit sendet, wo das richtige AFE des Slaves mit dem Basisbandprozessor verbunden ist. Die Zugriffssteuerung des Terminals wird durch den Beaconempfang synchronisiert, solange eine der Verbindungen zu den APs funktionstüchtig ist.

Das Problem der Taktdrift besteht auch für das neue MAC-Protokoll, wenn TDD im Single-Hop-Betrieb oder TDMA im Multi-Hop-Betrieb eingesetzt wird. Im Single-Hop-Betrieb richten sich die Slaves ein einziges Mal auf den Master aus. Nur der Master wechselt die Antennenausrichtung zu den Slaves. Im Polling-Betrieb initiiert der Master den Datentransfer. Es ist keine weitere Synchronisation notwendig. Sollte TDD eingesetzt werden, müssen auch die Slaves synchron auf das Medium zugreifen. Die Synchronisierung kann automatisch durch das Senden des ersten Pakets durch den Master erfolgen. Der Slave

darf dann nach einer festgelegten Zeit senden. Im Multi-Hop-Betrieb sind die Slaves auch temporäre Master, um die nachfolgenden Stationen mit Beacons zu versorgen. Eine signifikante Takt drift zwischen den Stationen tritt nur auf, wenn eine Verbindung über eine längere Zeit blockiert wird. Dann wird die Antennenausrichtung der blockierten Station auf die Standardausrichtung eingestellt, da längere Zeit keine Beacons eintrafen. Die Zeitspanne bis zum Umschalten auf die Standardausrichtung bei ausbleibenden Beacons kann verlängert werden, wenn die Taktfrequenzen der Stationen angeglichen werden (Syntonization). Dies kann mit Hilfe der Beacons erfolgen oder mit den bereits oben erwähnten Synchronisierungsverfahren.

### 7.3.2. Implementierung der Sequenznummernverwaltung mit gleitenden Fenstern

Im Gegensatz zum ersten Demonstrator unterstützt der MAC des zweiten Demonstrators das Aussenden mehrerer PHY-Frames hintereinander ohne auf eine Bestätigung vom Empfänger zu warten. Da die Reihenfolge der PHY-Frames durch Übertragungswiederholungen geändert sein könnte (siehe Abschnitt 5.4.2 auf Seite 79), erfolgt eine Wiederherstellung der Ausgabereihenfolge im Empfangspuffer. Dazu sind zusätzlich gleitende Fenster für die Verwaltung der Ausgabereihenfolge im Empfangspuffer notwendig. Die Fenster des Sende- und Empfangspuffers enthalten jeweils acht Einträge, d.h. es können maximal acht PHY-Frames hintereinander ohne Bestätigung gesendet werden. Die Anzahl der Sequenznummern beträgt das Doppelte der Fensterlänge.

Das in dieser Arbeit vorgestellte MAC-Protokoll vergibt, im Gegensatz zu den MAC-Protokollen der Demonstratoren, Sequenznummern auf Ethernet-Paketebene, um die Ausgabereihenfolge der Ethernet-Pakete bei Bedarf wiederherstellen zu können. Das ist deshalb notwendig, da Pakete unterschiedlicher Zielknoten (Multi-Hop) in einer MPDU aggregiert werden können. Die MPDU kann auch Übertragungswiederholungen oder fragmentierte Pakete enthalten. Werden Pakete mit Hilfe des Paketplaners aufgrund unterschiedlicher Prioritäten neu sortiert, darf die Ausgabereihenfolge nicht mit einem gleitenden Fenster wiederhergestellt werden. Sonst würden die folgenden Effekte im Ausgabepuffer auftreten:

- Die Ausgabe wird verzögert bis ein Paket mit der richtigen Sequenznummer eintrifft.
- Das Empfangsfenster wird weitergestellt und es werden Pakete in der falschen Reihenfolge ausgegeben, wenn die Sequenznummer des empfangenen Paketes *größer* als das Fensterende ist. Dieser Fall tritt sonst nur auf, wenn die maximale Anzahl der Übertragungswiederholungen eines Paketes erreicht ist und das Paket verworfen wird.
- Pakete werden verworfen, wenn die Sequenznummer *kleiner* als der Fensterstart ist.

Für die selektive Neuübertragung von Knoten zu Knoten wird eine zusätzliche Sequenznummer pro Paket (MSDU) vergeben. Diese ist nur für den entsprechenden Sendeknoten und Nachbarempfangsknoten gültig. Für jeden Nachbarknoten wird ein eigenes Sendefenster verwaltet. Die Größe des Sendefensters bestimmt die maximale Paketanzahl, die ohne Bestätigung versendet werden kann. Das hat auch Einfluss auf die Anzahl der PHY-Frames mit aggregierten Paketen, die hintereinander gesendet werden können. Kleine Pakete lasten den Sequenznummerbereich des Sendefensters mehr aus als große, so dass weniger PHY-Frames gesendet werden können. Ein großes Sendefenster ist deshalb anzustreben. Dabei sollten die Bestätigungen auf eine geeignete Weise innerhalb eines PHY-Frames übertragen werden. In einer Hardwareimplementierung stellt sich das Sendefenster als verkettete

Liste in einem Speicher dar. Neue Einträge für die Liste werden angehängt und können selektiv durch eintreffende Bestätigungen gelöscht werden. Das Anhängen stellt kein Problem dar, da das Ende der Liste in einem zusätzlichen Zeiger vermerkt werden kann. Das selektive Löschen ist aufwendiger, da die Liste nach der zu löschenden Sequenznummer durchsucht werden muß. Ein RAM-Block kann nur sequentiell durchsucht werden. Dafür werden maximal soviele Speichertakte wie belegte Einträge vorhanden sind benötigt. Wird der Speicher in Flip-Flops abgebildet, kann auf jede Speicherstelle beliebig zugegriffen werden und ein Vergleich aller Sequenznummern innerhalb eines Taktes erfolgen. Hinsichtlich des Zugriffs ist die zweite Version mit Flip-Flops günstiger, aber Flip-Flops im FPGA sind sehr teuer. Eine Fenstergröße von 128 Einträgen benötigt die doppelte Anzahl der Sequenznummern. Ein zusätzlicher Zeiger auf einen Speicherbereich mit Zusatzinformationen benötigt weitere 7 Bits. Zusammen werden 1920 Bits pro gleitendes Fenster und 15360 Bits für acht Fenster benötigt. Zum Vergleich: Eine Implementierung aller Fenster mit Speicherblöcken würde acht dedizierte Speicherblöcke benötigen. Die Verwaltung kann dann mit einer einfach oder doppelt verketteten Liste erfolgen.

### 7.3.3. Paketpuffer

Die Sendepufferstruktur besteht in beiden Demonstratoren aus einem FIFO-Puffer und dem eigentlichen Aggregationspuffer. Der FIFO-Puffer fängt Spitzen des Eingangspaketdatenstroms ab. Der Aggregationspuffer aggregiert die eingegangenen Pakete zu Blöcken. Jeder Block wird einzeln als PHY-Frame ausgesendet. Im ersten Demonstrator wird für jedes der beiden Ziele eine Aggregationspufferstruktur verwendet. Im Zweiten wird nur eine Aggregationspufferstruktur benötigt. Die Anzahl der Ausgabepuffer im Empfänger entspricht der Anzahl der Aggregationspuffer. Die Anzahl der Sende- und Empfangspuffer und somit die Anzahl der Zielstationen kann solange erhöht werden, wie Ressourcen im FPGA vorhanden sind. Da keine Routing-Tabelle vorhanden ist, können die Pakete nicht über Zwischenstationen weitergeleitet werden.

Das vorgestellte MAC-Protokoll unterstützt 256 Stationen. Die Pakete werden von Knoten zu Knoten bestätigt und können über Zwischenknoten geleitet werden, um ihren Zielknoten zu erreichen. Die Verwaltung der gleitenden Fenster für die Sequenznummern im Sende- und Empfangspfad wird deshalb nur für jeden direkt erreichbaren Knoten benötigt. Im Gegensatz zu den aufgebauten Demonstratoren kann eine aggregierte MPDU des neuen MAC-Protokolls Pakete für mehrere Zielknoten enthalten. Diese werden an die entsprechenden Zwischenknoten weitergeleitet.

Die MPDU wird zum Senden neu zusammengesetzt. Dabei kann die Reihenfolge der Pakete über die Zwischenknoten durch den Einsatz von Paketplanern oder durch Übertragungswiederholungen variieren. FIFO-Puffer sind nicht geeignet, da diese nicht selektiv ausgelesen und gelöscht werden können. Sind genug Speicherressourcen im FPGA vorhanden, kann für jedes direkte Ziel ein separater Paketpuffer integriert werden. Um jedoch kurzzeitige Ausfälle der Verbindung oder kurzzeitige Einbrüche der verfügbaren PHY-Datenrate abfangen zu können, wird in der vorgeschlagenen Hardwarearchitektur ein einziger Paketpuffer mit einer höheren Speicherkapazität genutzt. Der Puffer besteht aus einer hierarchischen Struktur bestehend aus internen und externen Speicherkomponenten. Es erfolgen gleichzeitig lesende und schreibende Speicherzugriffe, was bei der Dimensionierung der Speicherschnittstelle beachtet werden muß. Die vorgestellte Hardwareimplementierung nutzt 8 oder 16 MiB externen Speicher. Um die unterschiedlichen Zugriffsmethoden auf die externen Speicher zu maskieren, erfolgt der Zugriff durch den MAC über einen Zwischenspeicher (Prefetch-Cache), der aus FPGA-internem Speicher besteht.

Für die interne Paketübertragung mit 32-Bit-Worten markieren zwei zusätzliche Si-

Tabelle 7.4: Funktionsblöcke für Paketverarbeitung

Name	Funktion
SW	2 auf 4 MUX mit Auswahl des Ausgangsports
MUX	2 auf 1 MUX mit Round-Robin-Zugriffssteuerung (Basis: SW)
RR_CASC	Kaskadierung der Eingangsports von MUX auf 4,8,16
CONV	Änderung der Bitbreiten der Schnittstelle
DUP	Dupliziert ein Paketdatenstrom von einem auf zwei Ports
DUP_CASC	Kaskadierung von DUP auf 4,8,16 Ausgangsport
PFIFO	Paket-FIFO mit BRAM: Taktdomaintrennung, Anpassung der Portbreiten
PFIFO_FF	Paket-FIFO mit Flip-Flops: Anpassung der Portbreiten
CLASS	Extrahierung des Ethernet-Paketheaders und des VLAN-Tags, MAC-Lookup
MAC-Lookup	Speicherung der MAC-Adresse mit Port, Tabellenabfrage
ARP	Verarbeitung von ARP-Requests
MEM-IF	Verarbeitung von UDP-Requests zur Steuerung der Speicherschnittstelle

gnale den Start (SOF) und das Ende (EOF) eines Paketes. Das erleichtert die Verwaltung des Transportes der Pakete, da keine Längeninformationen transportiert und Datenwortzähler in den Datenpfad integriert werden müssen. Zusätzlich wird der Datenfluss mit zwei weiteren Signalen gesteuert. Die Sendeseite signalisiert mit SRC\_RDY, dass Daten bereitstehen. Die Empfangsseite signalisiert mit DST\_RDY, dass Daten entgegengenommen werden können. Die Funktionsweise basiert auf der *LocalLink Interface Specification* des FPGA-Herstellers Xilinx. Eine durch den Autor erstellte Komponentenbibliothek bietet eine Vielzahl von Funktionsblöcken für die Paketverarbeitung, wie z.B. in der Ethernet-Switch-Komponente in Abbildung 7.9 auf Seite 123 gezeigt wird. Tabelle 7.4 zeigt eine Auswahl dieser Funktionsblöcke.

Übertragungslatenzen entstehen auch durch die (Ethernet-)Paketverarbeitung. Ein 1518 Byte langes Paket benötigt für den Transport über einen 8-Bit-Datenbus ca. 12  $\mu$ s bei einem Datentakt von 125 MHz<sup>85</sup>. Jedes Ethernet-Paket verlässt mit dieser Latenz die Ethernet-PHY-Komponente des FPGAs. Die gleiche Zeit wird benötigt, bis das Paket die Ethernet-PHY-Komponente des Zielsystems verlassen hat. Die MAC-Komponenten benutzen einen 32 Bit breiten Datenbus, so dass für die Übertragung 3  $\mu$ s pro Paket benötigt werden. Der Paketpuffer kann ein Paket erst ausgeben, wenn es vollständig in den Speicher geschrieben wurde, d.h. alle Paketfragmente wurden in die entsprechenden Speicherfragmente kopiert. In der vorgeschlagenen MAC-Architektur werden Pakete direkt zum Puffer transportiert und zum Senden von dort über den Paket-Assembler ausgegeben. Innerhalb der MAC-Protokollverarbeitung werden Paketinformationsblöcke verwendet.

#### 7.3.4. MAC-Steuerautomat

In beiden Demonstratoren wird das MAC-Protokoll über mehrere endliche Automaten gesteuert. Die Steuerung der Funktionen der Sende- und Empfangspuffer sowie der *Frame Check*-Komponente werden jeweils von lokalen Automaten innerhalb der Komponenten durchgeführt. Der Medienzugriff wird über einen globalen Automaten mit weiteren abgesetzten Automaten gesteuert. Die Zustandsübergänge werden von eintreffenden Ereignissen gesteuert. Ereignisquellen sind z.B. abgesetzte Automaten, der Rahmenzeitgeber, der Timer, der Empfangspfad, der Sendepfad, die PLCP-Schnittstelle und im vorgestellten

<sup>85</sup>Das entspricht der Datenrate einer Gigabit-Ethernet-Verbindung.

MAC-Protokoll auch der Paketpuffer.

Eine Änderung des *Programmablaufs* ist nur umständlich über eine Neusynthese der Hardware möglich. Im zweiten Demonstrator wurde die Steuerung des Zugriffs über die Anwendungsschnittstelle in Software umgesetzt und mit einer Prozessorkomponente direkt im FPGA ausgeführt. Die Ausführung der Software wird über die gleichen Ereignisse wie die Hardwaresteuerung angesprochen. Die Ereignisse werden getrennt nach ihren Quellen über Pseudo-FIFOs in den Speicherbereich des Prozessors eingeblendet. Der Füllstand wird über die Software periodisch abgefragt. Eine Signalisierung von Zustandsänderungen über das Interruptsystem des Prozessors kann die Bearbeitung der Ereignisse beschleunigen, da die periodische Abfrage entfällt. So lassen sich auch komplexere Abläufe wie die der Nachbarschaftssuche in Software ausführen.

Zeitkritische Abläufe wie die des Paketassemblers, der *FRAME CHECK*-Komponente und der Paketsendesteuerung werden mit lokalen Hardwareautomaten gesteuert. Komplexe Berechnungen wie der Prüfsumme (CRC) eines 32-Bit-Wortes lassen sich mit einer Hardwareimplementierung in einem Takt ausführen. Das ermöglicht z.B. das Zusammensetzen der MPDUs im Sender und die Überprüfung und Zerlegung der eingehenden MPDUs aus dem Empfänger in Echtzeit durchzuführen.

### 7.3.5. MAC-Lookup im Ethernet-Switch

Die MAC-Lookup-Komponente speichert die Zuordnung der SRC-MAC-Adresse des eingehenden Paketes zum Ethernet-Switch-Port. Bevor ein Paket den Switch verlässt, wird anhand der DST-MAC-Adresse der Tabelleneintrag gesucht, um die Portadresse festzustellen. Die Suche muß für alle belegten Einträge der Tabelle erfolgen. Je nach Einsatzgebiet der Station fallen mehr oder weniger MAC-Adressen und somit Einträge in der Tabelle an. Um den Hardware- und Verarbeitungsaufwand zu beschränken werden maximal 256 Tabelleneinträge für die MAC-Adressen angenommen. Die zuletzt genutzten werden zusätzlich in einer Tabelle mit 32 Einträgen gespeichert. Die Speicher der Tabelle wird aus Flip-Flops erstellt, so dass das Suchergebnis mit einer parallelen Suche nach einem Takt zur Verfügung steht. Für die 32 Einträge werden 1600 Bits respektive Flip-Flops für die Hardwareimplementierung benötigt. Für den industriellen Einsatz sollte eine externe Lösung (IC) vorgesehen werden.

## 7.4. Komponenten des neuen Punkt-zu-Mehrpunkt MAC-Protokolls

Im Folgenden wird die Hardwarearchitektur des in Kapitel 5 vorgestellten MAC-Protokolls erläutert. Abbildung 7.7 zeigt eine detaillierte Übersicht der Systemarchitektur. Diese wird in die folgenden Hauptkomponenten eingeteilt: den Ethernet-Switch, den Sendepfad, den Empfangspfad und die Steuereinheit für die Systemverwaltung.

Der Ethernet-Switch ermittelt das Ziel eingehender Pakete und leitet diese an die zugeordneten Ausgangsports weiter. Die Zielinformation wird aus der MAC-Zieladresse des Ethernet-Pakets gewonnen. Ein Port ist einem Ethernet-PHY für die externe Netzwerkverbindung zugeordnet. Ein weiterer Port führt zum Sende- und Empfangspfad des MACs. Zwei weitere Ports sind jeweils mit einem ARP- und einem UDP-Servermodul verbunden.

Der Sendepfad verarbeitet alle Pakete, die über die drahtlose Schnittstelle übertragen werden sollen. Innerhalb der MAC-Schicht werden die Knoten über die interne 8 Bit breite MAC-Adresse angesprochen. Im Startknoten erreichen die Pakete den Sendepfad über den Ethernet-Switch. In den Zwischenknoten werden die weiterzuleitenden Pakete vom Empfangspfad an den Sendepfad übergeben. Der Puffer (*PP*) speichert alle auszugebenden Pakete. Die Paketplaner (*PS*) sortieren die Pakete nach ihrer Priorität. Die Paketsende-

## 7. Hardwareintegrationsaspekte

steuerung (*PSS*) verwaltet die Sendereihenfolge und die Übertragungswiederholungen der Pakete. Der Paketassembler erstellt die MPDU-Struktur während der Paketausgabe an die PHY-Schicht.

Im Empfangspfad werden alle eingehenden Pakete der drahtlosen Schnittstelle mit der *FRAME CHECK*-Komponente überprüft und die gültigen Pakete entweder an den Sendepfad oder an den Ethernet-Switch weitergeleitet. Die empfangenen Bestätigungen werden im RX-ACK-Sammler für die direkte Verarbeitung im Paketassembler aufbereitet. Eine Paketduplikaterkennung (*DUP CHECK*) verhindert die Weiterleitung doppelt empfangener Pakete an die Ausgabeeinheit. Die Ausgabeeinheit setzt Paketfragmente wieder zusammen und stellt bei Bedarf die Ausgabereihenfolge der Pakete zum Ethernet-Switch wieder her.

Zur Steuereinheit zählen alle Komponenten, die zur Konfiguration und Steuerung des Ablaufs des MAC-Protokolls dienen. Dazu gehören die globale Ablaufsteuerung (MAC-Status) für die Organisation des Medienzugriffs, der Rahmenzeitgeber und die Komponenten zur Speicherung der Konfigurationsmatrizen für die Slotbelegung.

Die Funktionalität dieser Komponenten kann in Software oder in Hardware implementiert werden. Die Entscheidung, ob eine Funktion in eine Hardware integriert oder als Softwaremodul implementiert wird, basiert auf den Anforderungen der Funktion und den vorhandenen Hardware- und Prozessorressourcen. Die Entscheidung basiert z.B. auf dem Datendurchsatz, der Dauer und der Periodizität der Ausführung, der Verarbeitungslatenz, der Komplexität und dem Ressourcenverbrauch der Hardware- bzw. Softwareimplementierung. Abhängig von der Art der Implementierung ändert sich der Datenfluss innerhalb des Systems. Abbildung 7.8a zeigt eine Kommunikationssystemstruktur mit einem in Software realisierten MAC. Der Basisbandprozessor (BB) ist als Hardwarekomponente über das Bussystem erreichbar. Die Software verarbeitet die eingehenden Ethernet-Pakete und schickt die zu sendenden Pakete an die BB-Hardwarekomponente. Empfangene Pakete werden wieder über die Ethernet-Schnittstelle ausgegeben. Alle Operationen laufen über den Systembus ab. Der Datenfluss ist mit einer roten Linie dargestellt. In Abbildung 7.8b wird die MAC-Funktionalität als Hardwarekomponente in das System eingebunden. Zusätzlich erfolgt die Steuerung der BB-Komponente direkt durch den MAC. Die Software übernimmt nur die Weiterleitung der Ethernet-Pakete von der Ethernet-Schnittstelle zum MAC bzw. vom MAC zur Ethernet-Schnittstelle. Die Aufgaben des MACs werden nun in der Hardware ausgeführt und belasten den Prozessor nicht mehr. Das in dieser Arbeit vorgeschlagene MAC-Protokoll nutzt die dritte Variante nach Abbildung 7.8c. Die CPU führt keine Aufgaben des Sende- und Empfangsdatenpfades durch, sondern nur komplexe Steuerungs- und Verwaltungsaufgaben wie die Systemkonfiguration, die Bereitstellung einer Nutzerschnittstelle zu höheren Schichten, die Sendeleistungssteuerung (TPC), die automatische Einstellung der Modulation und des Kodierungsverfahrens (ACM), die Neuberechnung der Konfigurationsmatrizen, die Aktualisierung der Routingtabellen und die explizite Nachbarschaftssuche. Die notwendige Leistung und die benötigten Ressourcen der CPU können an die Anforderungen dieser Steuerungsaufgaben angepaßt werden, um den Energie- und Hardwareressourcenverbrauch zu reduzieren.

### 7.4.1. Ethernet-Switch

Ein Ethernet-Switch verbindet mehrere Geräte in einem lokalen Netzwerk, indem eingehende Pakete an den oder die entsprechenden Empfänger weitergeleitet werden. In der vorgestellten Systemarchitektur werden die Ethernet-Pakete an den ARP- und den UDP-Server bzw. an den Ethernet- und/oder MAC-Port weitergeleitet. Der UDP-Server (*UDP MEM IF*) stellt eine Speicherschnittstelle für den Zugriff durch Konfigurations- und Steueranwendungen auf den internen Registerbereich des MAC-Protokolls bereit. Der ARP-



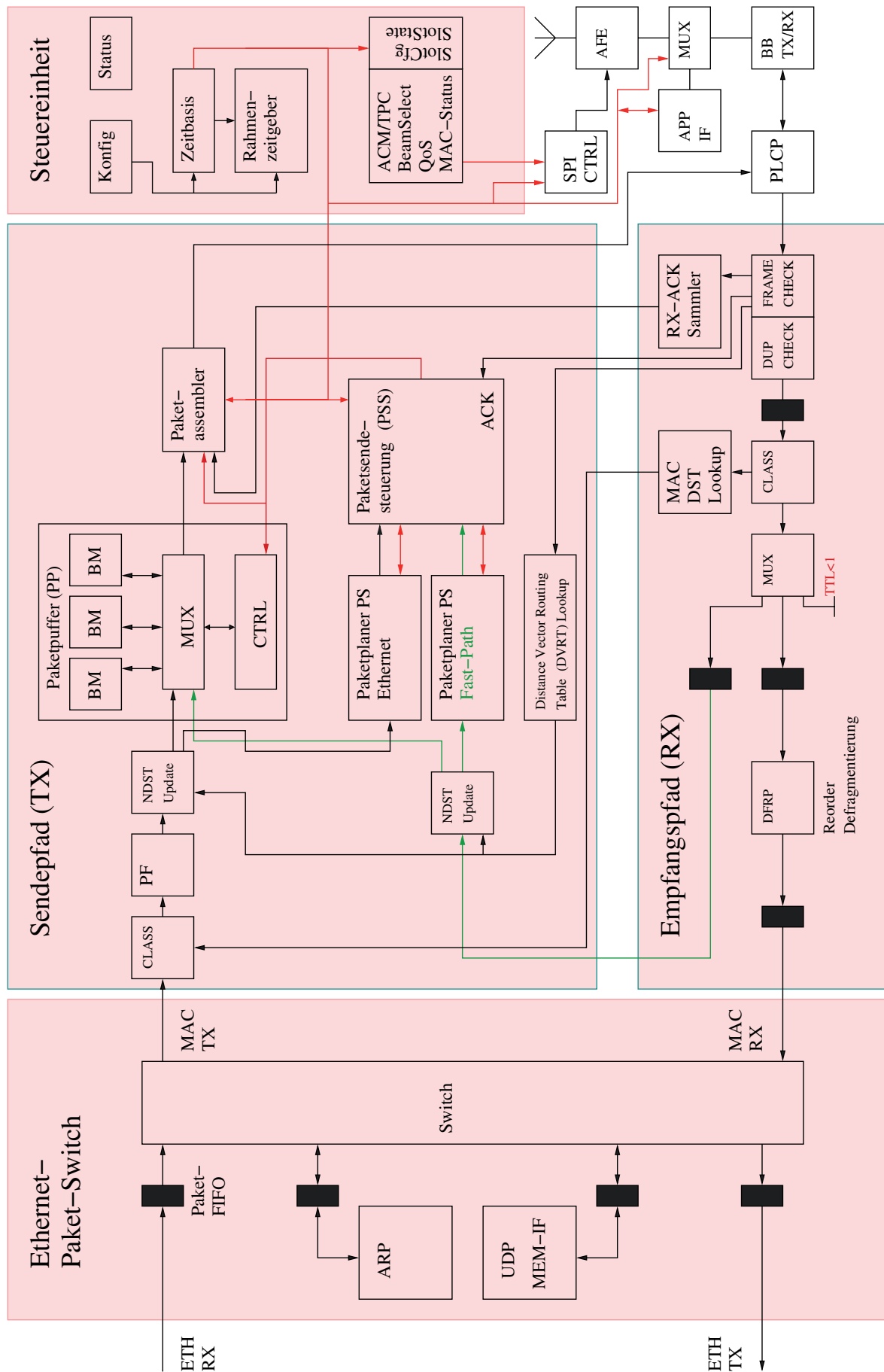
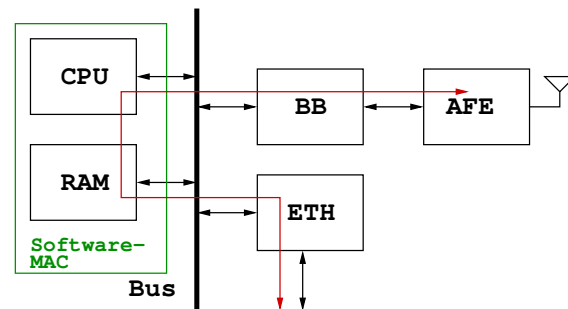
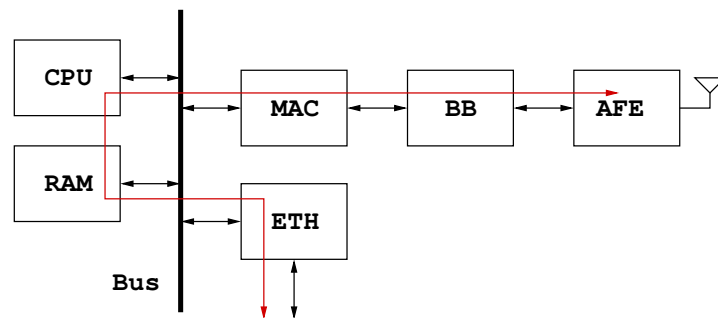


Abbildung 7.7: Systemübersicht des MAC für Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen und Multi-Hop-Funktionalität

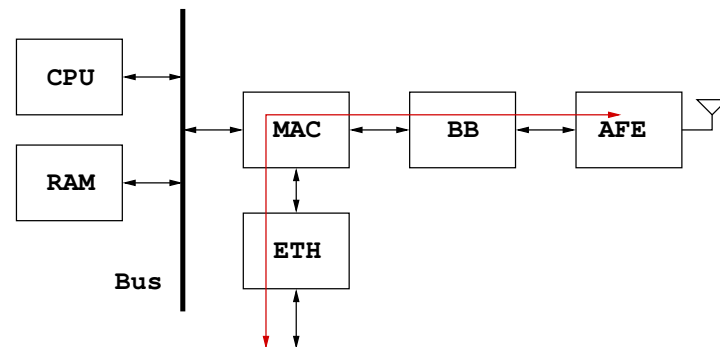
## 7. Hardwareintegrationsaspekte



(a) Software-MAC, BB als Hardware



(b) MAC und BB als Hardware, Paketweiterleitung über Software



(c) Eigenständiges HW-Kommunikationssystem

Abbildung 7.8: Verschiedene MAC-Implementierungen in einem Prozessorsystem

Server liefert die zur angefragten IP-Adresse zugehörige MAC-Adresse. Abbildung 7.9 zeigt eine detaillierte Übersicht des Ethernet-Paket-Switches.

Der Empfänger wird aus der Ziel-MAC-Adresse im Ethernet-Paketheader bestimmt. Beinhaltet ein Ethernet-Paket eine Ziel-MAC-Adresse vom Typ Broadcast, muss das Paket an alle anderen Ports verteilt werden. Wird ein Paket über einen Port empfangen, so wird der Quell-MAC-Adresse dem Port zugeordnet und diese Zuordnung für jede MAC-Adresse in eine Tabelle abgespeichert (backward learning). Die Zuordnung ermöglicht so die gezielte Weiterleitung eingehender Pakete nur an den betreffenden Ausgangsport. Dazu wird die Ziel-MAC-Adresse in der Tabelle nachgeschlagen und der dazugehörige Port ermittelt. Ist die Ziel-MAC-Adresse nicht in dieser Tabelle, so wird das Paket, wie beim Broadcast, an alle anderen Ports verteilt.

Es wird zwischen *store-and-forward* und *cut-through switching* unterschieden. Bei Ersterem wird das Paket abgespeichert und erst danach weitergeleitet. Bei Letzterem wird die Ausgabe des Paketes nach dem Empfang der Ziel-MAC-Adresse für die Ermittlung des Ausgangsports verzögert. Der hier implementierte Switch benutzt das letztere Verfahren, da es sich einfach mit der vorhandenen Funktionsbibliothek (siehe Tabelle 7.4 auf Seite 118) in Hardware implementieren lässt. Zusätzliche Paket-FIFOs überbrücken den Zeitraum für die Ermittlung des Ausgangsports und Wartezeiten durch belegte Pfade. Konkurrierende Zugriffe werden nach dem Round-Robin-Verfahren aufgelöst, d.h. bei gleichzeitigem Zugriffsversuch mehrerer Quellen auf einen Port wird jeder Quelle abwechselnd Zugriff gewährt.

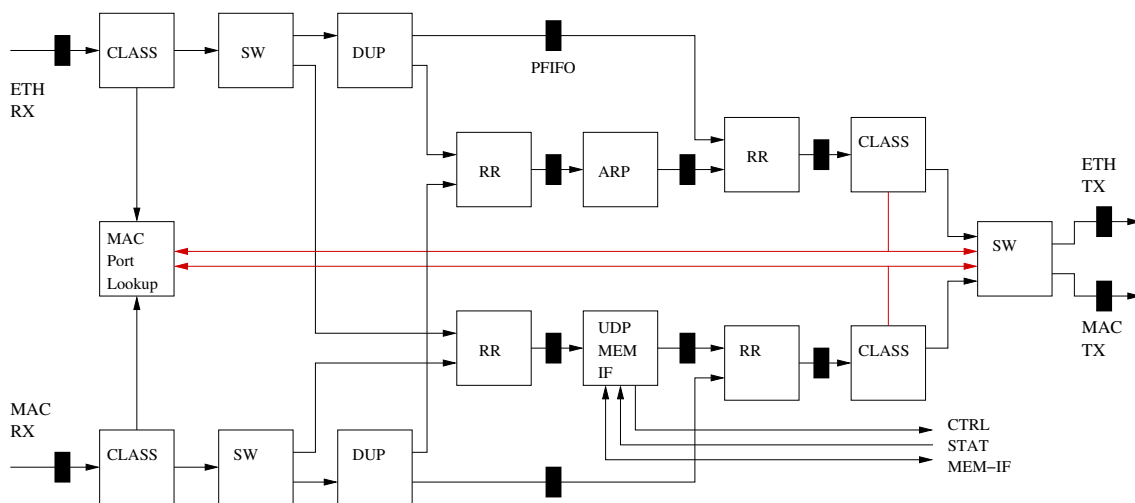


Abbildung 7.9: Vierport-Ethernet-Switch mit ARP- und UDP-Server

Bevor ein eingehendes Paket weitergeleitet wird, müssen die Quell- und die Ziel-MAC-Adressen gelesen werden. Die Quell-MAC-Adresse wird zusammen mit der internen Eingangsportnummer in einer Tabelle der *MAC-Port-Lookup*-Komponente gespeichert. Der Ausgangsport wird anhand der Ziel-MAC-Adresse bestimmt. Eine Broadcast-MAC-Adresse hat keinen Eintrag in der Tabelle. Broadcast-Pakete sowie Pakete mit MAC-Adressen ohne Tabelleneintrag werden an alle Ausgangsports außer dem Empfangsport weitergeleitet. Das Auslesen der Quell- und der Ziel-MAC-Adresse übernimmt die Klassifizierungskomponente *CLASS*. Diese verzögert die Weiterleitung des Paketes, bis die Antwort von der *MAC-Port-Lookup*-Komponente bereitsteht.

### 7.4.1.1. ARP

Die Verwendung IP-basierter Protokolle wie UDP<sup>86</sup> oder TCP<sup>87</sup> setzt die Verwendung des Adressauflösungsprotokolls ARP<sup>88</sup> voraus [16]. Mit diesem wird die zu einer IP-Adresse zugehörige MAC-Adresse ermittelt. Alle eingehenden Pakete werden dahingehend überprüft, ob eine ARP-Anfrage für die IP-Adresse des UDP-Servers (MEM IF) vorliegt. Ist das der Fall, wird eine ARP-Antwort mit der konfigurierten MAC-Adresse generiert. Die Antwort verlässt den Switch über den Ausgangsport der ARP-Anfrage.

### 7.4.1.2. Speicherschnittstelle mit UDP-Server

Die Speicherschnittstelle (MEM IF) stellt einen Adressausgang und einen bidirektionalen Datenport sowie ein Anforderungs- und Bestätigungssignal für das Schreiben und Lesen einer Speicheradresse zur Verfügung. Die Schreib- und Lesefunktionen der Speicherschnittstelle werden über das UDP gesteuert.

Pakete mit der MAC-Adresse der Speicherschnittstelle werden an die Komponente MEM-IF weitergeleitet. Das empfangene Paket wird dahingehend überprüft, ob der IP- und der UDP-Header gültig sind und ob die UDP-Portnummer übereinstimmt. Der Datenteil des UDP-Pakets enthält die Schreib- und Leseanfragen an die Speicherschnittstelle.

Eine Anwendung stellt eine Anfrage zum Lesen oder Schreiben von Daten, indem sie ein UDP-Paket mit einer Schreib- und Leseanfrage an die IP-Adresse der Speicherschnittstelle schickt. Es können maximal 1024 Bytes pro Anfrage und Antwort übertragen werden. Die Leseanforderung enthält eine 32-Bit-Adresse sowie die Anzahl der zu lesenden Daten. Die Anfrage wird um die gelesenen Daten erweitert und zurückgesendet. Eine Schreib- anfrage enthält bereits die zu schreibenden Daten. Als Antwort wird die Anfrage ohne die geschriebenen Daten mit der Anzahl der geschriebenen Daten zurückgesendet. Eine fehlerhafte Anfrage wird mit einer Ablehnung (NAK) beantwortet.

### 7.4.2. Sendepfad

Der Sendepfad verarbeitet alle Pakete, die die Station bzw. den Knoten über die drahtlose Schnittstelle verlassen sollen. Der Sendepfad erhält Pakete über den Ethernet-Switch und über den Empfangspfad. Die Pakete aus dem Empfangspfad müssen über diesen Zwischenknoten weitergeleitet werden, um den Endknoten erreichen zu können.

Für alle eingehenden Pakete aus dem Ethernet-Switch wird mit der Klassifizierungskomponente *CLASS* die Endknotenadresse (MDST) aus der MAC-Adresse bzw. dem VLAN-Tag des Ethernet-Paketes bestimmt. Diese wird zusammen mit dem Paket an die Paketfragmentierungskomponente (*PF*) weitergeleitet. Dort werden Pakete bei Bedarf in kleinere Fragmente zerlegt. Vor der Speicherung im Paketpuffer (*PP*) wird die MAC-Adresse des nächsten Zwischenknotens (NDST) mit Hilfe der *Distance Vector Routing Table (DVRT)*-*Lookup*-Komponente bestimmt. Die Pakete werden dann im Paketpuffer gespeichert und die Paketinformation an den Paketplaner weitergegeben.

Für alle Pakete, die aus dem Empfangspfad eingehen, muss nur noch die MAC-Adresse des nächsten Zwischenknotens (NDST) bestimmt werden. Dann können die Pakete in den Paketpuffer geschrieben und die Paketinformation an den Paketplaner weitergegeben werden.

---

<sup>86</sup>UDP - User Datagram Protocol

<sup>87</sup>TCP - Transport Control Protocol

<sup>88</sup>ARP - Address Resolution Protocol

Weiterzuleitende Pakete werden zuerst gesendet und darauf folgend die Pakete, bei denen die nächste Station (NDST) das direkte Ziel (MDST) ist. Die Einhaltung der vorgeschriebenen Bandbreiten für die jeweiligen Zielstationen wird über die Paketplaner sichergestellt. Die Erstellung der MPDU-Struktur (siehe Abschnitt 5.6 auf Seite 89) und die Ausgabe an die PHY-Schicht übernimmt der Paketassembler. Im Folgenden werden die Kernkomponenten im Detail erläutert.

### 7.4.2.1. Paketklassifizierung

Eingehende Ethernet-Pakete werden mit der Komponente *CLASS* klassifiziert. Dabei wird die Quell- und die Ziel-MAC-Adresse und ein vorhandenes VLAN-Tag extrahiert. Ein VLAN-Tag enthält die VLAN-ID und das CoS-Feld (siehe Abschnitt 3.1.1 auf Seite 24). Ist ein VLAN-Tag vorhanden, wird die MAC-Adresse des Endknotens (MDST) direkt aus der VLAN-ID abgeleitet. Andernfalls wird MDST über die *MAC-DST-Lookup*-Komponente ermittelt. Diese speichert, wie die *MAC-Port-Lookup*-Komponente des Ethernet-Switches, die Zuordnungen der MAC-Adressen zu den SRC-MAC-Adressen der über die drahtlose Schnittstelle empfangenen Ethernet-Pakete. Kann die Adresse wegen fehlender Tabelleneinträge nicht abgeleitet werden, so wird MDST auf die Broadcast-Adresse gesetzt. Diese Informationen werden in der folgenden Paketfragmentierungskomponente (PF) für die Generierung des Aggregationsheaders (AH) benötigt.

### 7.4.2.2. Paketfragmentierung

Überschreitet das eingehende Paket eine vorkonfigurierte Länge, so wird es durch die Komponente (PF) in maximal acht Fragmente mit einer vordefinierten Fragmentlänge zerlegt. Wird die Anzahl der Fragmente überschritten, so wird das Paket verworfen. Jedes Paket wird um einen Aggregationsheader (AH) erweitert und mit einer laufenden Sequenznummer (SEQ) und der MAC-Adresse des Endknotens (MDST) versehen (siehe Abschnitt 5.4.4 auf Seite 80). Jedes erzeugte Fragment eines Paketes wird mit dem gleichen Aggregationsheader erweitert. Dieser unterscheidet sich nur im Feld FGNR, das Steuerinformationen für die Fragmentierung enthält.

### 7.4.2.3. Ermittlung des nächsten Zwischenknotens

Pakete erreichen den Sendepfad über die Ethernet-Schnittstelle sowie über die Funkverbindung. Zum Weiterleiten muss die Adresse des nächsten Knotens abhängig von der Zielknotenadresse bestimmt werden. Die Komponente *NDST-Update* ermittelt aus der Zieladresse (MDST) die MAC-Adresse des nächsten Knotens (NDST). Dazu wird die Route mit den wenigsten Hops zum Zielknoten (MDST) aus der Routingtabelle (*DVRT*) ermittelt und die Knotenadresse des nächsten Hops in das Feld NDST übertragen. Im Falle einer Broadcast-Adresse wird das Paket an jeden benachbarten Knoten mit einer aktiven Verbindung gesendet (siehe Abschnitt 5.4.8.2). Das Paket wird nun zusammen mit der Anzahl der aktiven Nachbarknoten an den Paketpuffer (PP) übergeben (siehe Abschnitt 7.4.2.6 auf Seite 128). Wenn das Paket erfolgreich in den Puffer eingestellt wurde, wird als Antwort eine Paketpuffer-ID (PP-ID) zurückgegeben. Für die weitere Paketsteuerung im Sendepfad wird ab diesem Zeitpunkt ein Paketinformationsblock (PIB) genutzt. Das reduziert die Anzahl der Daten, die zwischen den Komponenten ausgetauscht werden müssen. Tabelle 7.5 auf der nächsten Seite enthält die Beschreibung der Felder des PIBs. Wird ein Paket an mehrere Knoten gesendet, so werden genauso viele PIBs mit der gleichen PP-ID generiert. Das NDST-Feld des PIBs wird auf die entsprechende Knotenadresse gesetzt. Die generierten PIBs der Pakete werden dann an die entsprechenden Paketplaner weitergegeben.

Tabelle 7.5: Paketinformationsblock (PIB)

Feld	Beschreibung
PP-ID	Paketpuffer-ID
LEN	Länge des Paketes/Fragmentes
MDST	Zielknotenadresse
MSRC	Quellknotenadresse
CoS	Class-of-Service (VLAN-Tag)
RCNT	Übertragungswiederholungszähler
TTL	Time-to-Life-Zähler
MSEQ	MAC-Sequenznummer
NDST	nächster Hop

### 7.4.2.4. Distance Vector Routing Table (DVRT) Lookup

Die DVRT speichert für alle Endknoten den nächsten Hop sowie die Anzahl der Hops bis zum Ziel. Die Tabelle hat so viele Einträge wie Knotenadressen vorhanden sind. Sie ist als Speicherblock implementiert. Das vorgestellte MAC-Protokoll unterstützt 256 Knotenadressen und 256 Hops. Die Speicherung der Knotenadresse des nächsten Hops sowie die Anzahl der Hops bis zum Ziel benötigt jeweils acht Bits, so dass der Speicherblock aus 256 Adressen mit je 16 Datenbits besteht. Reduziert sich die Anzahl der Knoten, kann die Bitbreite verringert werden. Dabei ist zu gewährleisten, dass aufeinanderfolgende Knotenadressen genutzt werden.

### 7.4.2.5. Blockspeicher

Ein Blockspeicher (*BM*) stellt die effiziente Speicherung von Paketen unterschiedlicher Länge in einem großen Speicherbereich bereit und ist eine Basiskomponente des Paketpuffers (*PP*). Für den Speicher können die lokalen Speicherressourcen des FPGAs sowie externe Speicherressourcen der Hardwareplattform verwendet werden. Die Komponente stellt eine einfache Datenpaket- und Steuerschnittstelle zur Verfügung.

Abbildung 7.10 zeigt die Struktur der Komponente. Der Steuerung (*CTRL*) verteilt die eingehenden Schreib- und Lesekommandos auf die entsprechenden Nebeneinheiten (Paketeingabe/Paketausgabe). Dazu müssen die entsprechenden Fragmente des zu bearbeitenden Paketes bereitgestellt werden. Das Löschkommando wird direkt im Modul *controller* bearbeitet.

Normalerweise verursacht das Einstellen von Paketen unterschiedlicher Länge in Verbindung mit wahlfreiem Löschen eine Speicherfragmentierung. Obwohl in der Summe noch genug Speicher frei ist, kann es sein, dass kein zusammenhängender Speicherblock mit ausreichender Größe für ein eingegangenes Paket zur Verfügung steht. Eine Zusammenfassung der wieder freigegebenen Speicherbereiche erfordert eine Verwaltungsphase (Garbage collection/Defragmentierung), in der belegte Speicherbereiche umkopiert werden müssen. Während der Defragmentierung ist der Speicher für den normalen Zugriff blockiert, was im Betrieb zu Paketverlusten führen kann. Dieses Problem wird durch die Einteilung des Speichers in gleichgroße Speicherfragmente verhindert. Das zu speichernde Paket wird in Fragmente entsprechend der Speicherfragmentgröße zerlegt und dann auf freie Speicherblöcke verteilt.

Für die Verwaltung des *BM* wird eine Speicherbelegungstabelle benötigt. Um nicht jedes Mal nach einem freien Speicherfragment in der Tabelle suchen zu müssen, wird zusätzlich

eine Liste der freien Speicherfragmente geführt. Diese reduziert die Zugriffszeit auf die Speicherbelegungstabelle in der Hardwareimplementierung. Tabelle 7.6 auf der nächsten Seite zeigt eine Übersicht verschiedener Konfigurationen abhängig von der Speichergröße und von der Speicherfragmentlänge mit dem dazugehörigen Ressourcenverbrauch der Verwaltungsstrukturen. Die Werte in Klammern beschreiben die entsprechenden Bitbreiten. Die Speicherverwaltung benötigt zusätzlichen schnellen lokalen Speicher (SRAM/BRAM). Eine Einteilung des Speichers in Fragmente zu je 256 Bytes benötigt ca. 3% zusätzlichen Speicher bezogen auf den zu verwaltenden Speicherbereich. Die Werte der Tabelle 7.6 basieren auf maximal 64 Paketfragmenten ( $NFP_{MAX} = 64$ ) und erlauben somit eine maximale Paketlänge von 16 KiB. Werden nur Pakete bis 2048 Bytes gespeichert, sind maximal 8 Fragmente bei 256 Bytes pro Speicherfragment erforderlich. Im ersten Fall werden 6 Bit und im letzten Fall 3 Bit für die Speicherung der Anzahl der Fragmente benötigt. Eine Reduzierung um 3 Bit spart so Ressourcen von 48 KiB in der Konfiguration mit 8 MiB<sup>89</sup> Hauptspeicher. Die Datenbitbreite des Speicherinterfaces des Pufferspeichers von 32 Bit spart zusätzlich 2 Bits bei der Speicherung der Fragmentlänge. Die Speicherfragmentgröße sollte so gewählt werden, dass die erwarteten Paketgrößen möglichst einem Vielfachen der Speicherfragmentgröße entspricht. Damit wird so wenig Speicher wie möglich verschwendet. Der schlechteste Fall ist ein Speicherfragment mit einem belegten Byte.

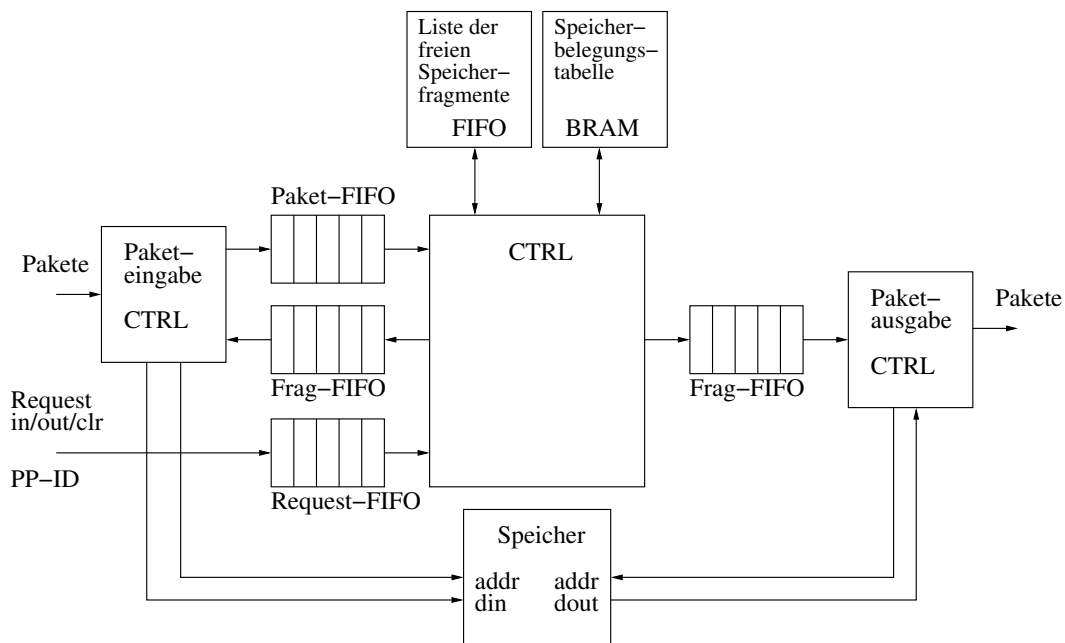


Abbildung 7.10: Architektur des Blockspeichers (BM)

**Speicherbelegungstabelle** Die Speicherbelegungstabelle verwaltet die Belegungsinformation aller Speicherfragmente als einfach verkettete Liste. Ein Eintrag der Tabelle besteht aus der Position des nächsten verketteten Fragmentes (FNPOS), der Anzahl der belegten Bytes des Fragmentes (FLEN), der Anzahl der verketteten Fragmente für das Paket (FCNT), der Anzahl der Kopien des Paketes (UCNT) und einer Markierung für den Anfang einer Speicherfragmentkette (TVLD). Beim Start des Systems wird die Tabelle mit hintereinander liegenden Paketen von maximaler Paketlänge initialisiert. Dazu muss jede Speicherposition einmal beschrieben werden. Die Initialisierungszeit  $T_{INIT}$  beträgt 524,288  $\mu s$  in der

<sup>89</sup>1 Mebibyte (MiB) =  $2^{20}$  Bytes = 1048576 Bytes nach DIN EN 80000-13:2009-01

## 7. Hardwareintegrationsaspekte

größten Speicherkonfiguration mit 65536 Einträgen und einer Speicherfragmentlänge von 256 Bytes bei 125 MHz Taktfrequenz. Jedes Startfragment eines Paketes wird in die Liste der freien Speicherfragmente (FREE\_LIST) mit der maximalen Anzahl der Fragmente pro Paket hinzugefügt.

**Liste der freien Speicherfragmente** Die Liste der freien Speicherfragmente wird in einem FIFO gespeichert. Die Anzahl der Einträge (Tiefe des FIFOs) entspricht der Anzahl der möglichen Fragmente. Jeder Eintrag enthält das freie Startfragment (FPOS) und die Anzahl der weiter verketteten Fragmente (FCNT).

Tabelle 7.6: Übersicht über die Verwaltungsressourcen des Blockspeichers

Memory	Fragment		Alloc	Free	$\Sigma$		$R$
Size [KiB]	LEN	CNT	Bitbreite	Bits	[KiB]	[%]	
128	256 ( 8)	512 ( 9)	27	15	42	3	3
(17)	512 ( 9)	256 ( 8)	27	14	41	2	2
	1024 (10)	128 ( 7)	27	13	40	1	1
	2048 (11)	64 ( 6)	27	12	39	1	1
1024	256 ( 8)	4096 (12)	30	18	48	24	3
(20)	512 ( 9)	2048 (11)	30	17	47	12	2
	1024 (10)	1024 (10)	30	16	46	6	1
	2048 (11)	512 ( 9)	30	15	45	3	1
8192	256 ( 8)	32768 (15)	33	21	54	216	3
(23)	512 ( 9)	16384 (14)	33	20	53	146	2
	1024 (10)	8192 (13)	33	19	52	85	1
	2048 (11)	4096 (12)	33	18	51	42	1
16384	256 ( 8)	65536 (16)	34	22	56	448	3
(24)	512 ( 9)	32768 (15)	34	21	55	220	2
	1024 (10)	16384 (14)	34	20	54	108	1
	2048 (11)	8192 (13)	34	19	53	53	1

### 7.4.2.6. Paketpuffer

Die Paketpufferkomponente (PP) kapselt alle Module des Puffers. Abbildung 7.11 zeigt den strukturellen Aufbau des Puffers. Dieser besteht aus mehreren Blockspeichermodule (BM): *MAIN*, *Prefetch*, *Fast-Path*, dem Datenpfad und der Steuereinheit mit ihren Verwaltungsstrukturen.

Alle eingehenden Pakete werden im Hauptspeicher (*MAIN*) abgelegt. Dieser belegt die größten Ressourcen in einem externen RAM. Die Anbindung erfolgt über eine dedizierte Schnittstelle der Hardwareplattform. Pakete, die im nächsten oder übernächsten Slot auszugeben sind, werden im Voraus aus dem Hauptspeicher in den lokalen Zwischenspeicher (*Prefetch*-Cache) kopiert. Die Steuerung erfolgt durch die Paketsendesteuerungskomponente (*PSS*) im Sendepfad. Pakete aus dem Empfangspfad, die im nächsten oder übernächsten Slot weitergeleitet werden sollen, werden zusätzlich in einen separaten *Fast-Path*-Cache kopiert. Das vermeidet Engpässe im Datenpfad der Pufferstruktur, da diese Pakete sonst in den *Prefetch*-Cache kopiert werden müssten, während der Eingangspfad durch die *Prefetch*-Operationen blockiert ist. Der Engpaß könnte auch durch eine Erhöhung des Verarbeitungstaktes oder durch einen breiteren Speicherbus gelöst werden. Beim



ersten Lösungsbeispiel werden Speicherressourcen eingespart, aber durch den höheren Takt werden die Anforderungen bei der Synthese des FPGA-Designs gesteigert.

Beim Auslesen wird das entsprechende Paket sofern vorhanden aus einem der Caches genutzt und anschließend aus diesem Cache gelöscht. Ist der Cache voll und soll ein neues Paket eingestellt werden, so werden die ältesten Einträge gelöscht, bis das neue Paket Platz findet. Ist ein auszugebendes Paket nicht im Cache, so wird das Paket direkt aus dem Hauptspeicher ausgegeben. Ein Prefetch für Neuübertragungen kann jederzeit wieder erfolgen. Je nach Latenz des Hauptspeichers muss der Zeitpunkt der Anforderung für das Prefetch bestimmt werden. Dazu werden die aktuellen Zugriffsparameter (Latenz, Durchsatz) der Speicherschnittstelle an die übergeordnete Paketsendesteuerung übermittelt.

Jedes Paket erhält bei der Speicherung eine Identifikationsnummer PP-ID. Über diese kann das Paket ausgegeben, gelöscht bzw. in den Prefetch-Cache kopiert werden. Wird das Paket gelöscht, wird auch der Speicher der Kopie im Cache freigegeben. Bei der Speicherung eines Paketes wird ein Referenzzähler angegeben. Dieser verwaltet virtuelle Kopien für duplizierte Pakete, z.B. für Broadcasts. Nach dem Löschen eines Paketes wird der Referenzzähler um Eins reduziert und beim Erreichen der Null wird der Speicher des Paketes endgültig freigegeben.

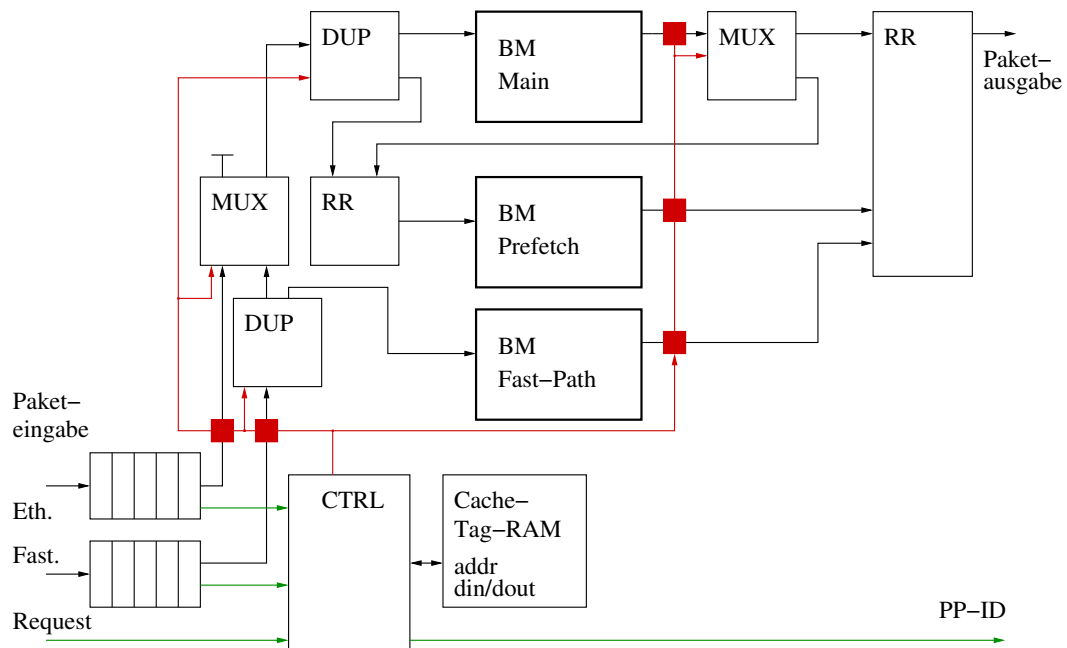


Abbildung 7.11: Architektur des Paketpuffers (PP)

**Hauptpaketpuffer** Der Hauptpaketpuffer (*MAIN*) nutzt einen Teil (<16 MiB) des externen DDR3-Speichers der FPGA-Hardwareplattform. Dieser Speicher wird auch von den Prozessoren genutzt. Das kann u.U. höhere Latenzen in der Bereitstellung der Daten verursachen. Durch eine geeignete Priorisierung der Anfragen an die Speicherzugriffssteuerung des externen Speichers wird eine maximale Latenz garantiert.

**Prefetch- und Fast-Path-Cache** Die Zwischenspeicher nutzen die internen FPGA-Speicherressourcen (BRAM). Der Zugriff auf die Speicherschnittstelle des BRAM erfolgt exklusiv und deterministisch. Die Speichergröße wird von den Parametern Slotdauer und PHY-Datenrate bestimmt.

Ein Beispiel: Kann bei einer Slotdauer von ca. 100  $\mu$ s eine MPDU mit maximal 16 KiB übertragen werden und wird das Prefetching zwei Slots vorher begonnen, so müssen mindestens zwei mal 16 KiB für den Puffer vorgesehen werden. Das gilt unter der Annahme, dass die Pakete des aktuellen Slots mit der gleichen Datenrate entnommen werden. Da die Puffer nur jeweils einmal implementiert werden, sollte es kein Problem sein, den Puffer um weitere 16 KiB zu vergrößern.

**Cache-Tag-RAM** Im *Cache-Tag-RAM* werden die Zuordnung der Identifikationsnummern des Hauptspeichers und der Caches gespeichert. Die Information steht der Steuerung nach einem Speichertakt zur Verfügung.

### 7.4.2.7. Paketplaner / Paketscheduler

Im vorgestellten System werden zwei unterschiedliche Paketplaner (*PS*) benutzt, die jeweils mit dem Deficit-Weighted-Round-Robin-Algorithmus (DWRR) eine durch die Steuereinheit vorgegebene Bandbreite/Datenrate garantieren. Der DWRR wird wegen seines geringen Bedarfs an Hardwareressourcen eingesetzt. Werden andere Anforderungen an den Paketplaner gestellt, kann dieser einfach durch einen entsprechenden Typ ersetzt werden. Die Paketplaner benutzen die Paketinformationsblöcke (PIB) zur Paketverwaltung.

Abbildung 7.12 auf der nächsten Seite und Abbildung 7.13 auf Seite 132 zeigen die Struktur der beiden Paketplaner. Die Warteschlangen bestehen aus FIFOs und speichern die PIBs. Die Ausgabe erfolgt durch den DWRR auf der Grundlage der eingestellten Bandbreiten und der angeforderten Anzahl der Daten.

Der Paketplaner für die eingehenden Ethernet-Pakete unterstützt jeweils acht Prioritätswarteschlangen für jede Nachbarstation. Jeder eingehende Paketinformationsblock wird auf die entsprechend der Priorität (PIB.CoS) zugehörige Warteschlange der Zielstation (PIB.NDST) geleitet. Jeder Warteschlange ist ein Bandbreitengewicht zugeordnet, jedem Warteschlangenblock bestehend aus den Prioritätswarteschlangen je Nachbarstation ist eine Bandbreite zugeordnet. Die Anzahl der auszugebenden Daten respektive Pakete hängt von der Slotdauer und der PHY-Datenrate ab und wird von der *PSS* vorgegeben.

Der Paketplaner für die weiterzuleitenden Daten aus dem Empfangspfad enthält einen Warteschlangenblock mit acht Prioritätswarteschlangen. Jeder Warteschlange ist ein Bandbreitengewicht zugeordnet.

Die Bandbreiten für jeden Datenstrom werden automatisch durch die Paketplaner garantiert. Eingehende Pakete werden verworfen, wenn die entsprechende Warteschlange überläuft. Die Bandbreite kann u.U. nicht mehr zur Verfügung gestellt werden, wenn sich die PHY-Datenrate ändert. Dann wird die Ausgabebandbreite der Paketplaner durch die MAC-Steuereinheit neu konfiguriert. Die Prioritäten sichern die Weiterleitung der *wichtigen* Pakete aus dem Paketplaner für beide Eingangspfade.

### 7.4.2.8. Paketsendesteuerung: Aggregation und Übertragungswiederholung

Die Paketsendesteuerung (*PSS*) verwaltet die gleitenden Fenster für die Übertragungswiederholungen, steuert das Prefetching der zu übertragenden Pakete und bestimmt die Paketreihenfolge für die Paketausgabe an den Paketassembler. Dazu werden die folgenden Steuerinformationen durch andere Komponenten bereitgestellt:

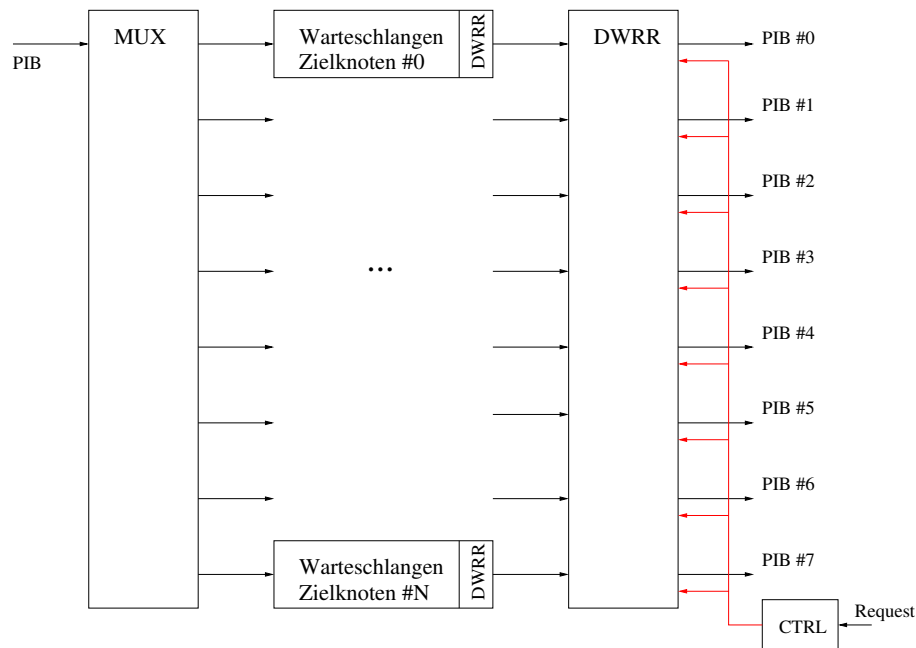


Abbildung 7.12: Architektur des Paketplaners (PS) für den Eingangspfad (Ethernet)

- MAC-Steuereinheit: Zielknotenadresse, Slotdauer und PHY-Datenrate des aktuellen und der nächsten beiden Slots
- Paketplaner: Warteschlangenstatus
- Frame-Check: extrahierte Bestätigungen aus dem MAC-Header und dem Post-ACK-Block

Abbildung 7.14 auf Seite 133 zeigt die Struktur der PSS. Für jeden Nachbarknoten wird eine Komponente für das gleitende Fenster zur Steuerung der Paketreihenfolge eingesetzt. Eine lokale Steuereinheit führt die Anforderungen der MAC-Steuereinheit aus.

Die Sendereihenfolge wird mit Hilfe der gleitenden Fenster hergestellt. Die Implementierung besteht aus einer Speicherstruktur, die das selektive Löschen von Einträgen erlaubt. Für jeden Nachbarknoten wird eine eigene Liste verwaltet. Trifft ein PIB aus einem der Paketplaner ein, so erhält der PIB eine Sequenznummer (MSEQ) entsprechend der Zieladresse des nächsten Knotens (NDST) und wird am Ende der Liste angefügt. Bestätigte Sequenznummern werden aus der Liste gelöscht. Beim nächsten Senden werden automatisch die Übertragungswiederholungen und dann die noch nicht bestätigten Pakete gesendet. Nach jedem Senden wird der Sendewiederholungszähler erhöht. Beim Überschreiten der maximalen Anzahl an Wiederholungen wird das Paket verworfen indem der Eintrag aus der Liste entfernt und der Speicher im Puffer freigegeben wird. Ein Paket, das nicht bestätigt werden soll, wird nach dem Aussenden gelöscht. Wird ein Fragment eines Paketes gelöscht, so werden alle Fragmente mit der gleichen Sequenznummer (SEQ) gelöscht. Freie Einträge in der Liste werden über eine Anfrage an den entsprechenden Paketplaner aufgefüllt.

Mit Hilfe der Zieladressen der nächsten Slots werden die entsprechenden Pakete für das Prefetching ausgewählt. Soll die Übertragung eines PHY-Frames pünktlich zum Slotbeginn erfolgen, muss der PHY-Header mindestens  $T_{TXdel}$  vor dem Slotbeginn im Basisbandprozessor (BB) eingetroffen sein (siehe Abschnitt 4.1). Der PHY-Header kann aber erst an den BB übermittelt werden, wenn die Länge des PHY-Framepayloads bekannt ist. Der Payload besteht aus dem MAC-Header sowie weiteren optionalen Protokollsteuerblöcken und

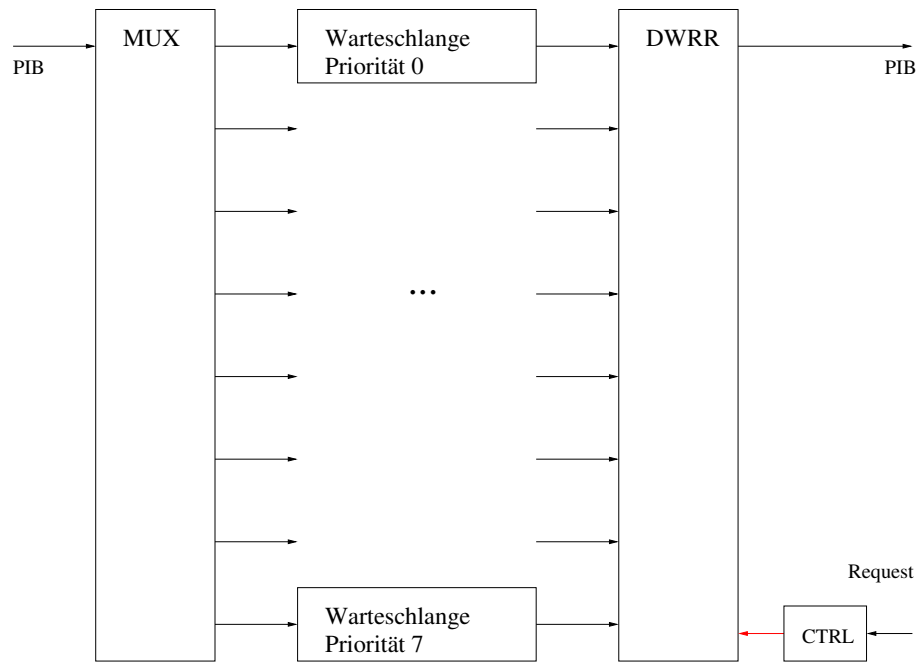


Abbildung 7.13: Architektur des Paketplaners (PS) für den Weiterleitungspfad (Fast-Path)

optionalen Datenblöcken (siehe Abschnitt 5.6 auf Seite 89). Abhängig von der Slotdauer und der PHY-Datenrate wird die verfügbare Anzahl der Daten abzüglich des System-overheads (MAC-Header, Protokollsteuerblöcke ...) bestimmt. Diese Operation muss u.U. zweimal durchgeführt werden. Einmal, um die Pakete in den Prefetch-Cache zu laden und ein zweites Mal, um die (vorgeladenen) Pakete an den Paketassembler zu übergeben. Sind Pakete im Fast-Path-Cache, werden diese zuerst ausgegeben. Danach folgen die Pakete aus dem Prefetch-Cache. Es wird jeweils der Anteil der Daten entsprechend der eingestellten Bandbreite übertragen.

### 7.4.2.9. Paketassembler

Der Paketassembler (*PFA*) setzt aus dem MAC-Header und den angeforderten Paketen eine MPDU zusammen, d.h. die MPDU wird bei der Ausgabe an den BB zusammengesetzt. Dabei werden alle Prüfsummen des MAC-Headers, der Protokollsteuerblöcke und der Datenblöcke aktualisiert. Ein zusätzlicher Post-ACK-Block muss im Zeitbudget des Slots mit eingeplant werden, d.h. die Anzahl der auszugebenden Daten reduziert sich um weitere 48 Bytes (siehe Tabelle 5.12 auf Seite 92).

Zuerst wird der MAC-Header mit dem ACK-Block für die Zieladresse, dem Pufferstatus und weiteren Protokollsteuerungsinformationen an den BB ausgegeben. Der ACK-Block wird durch den später vorgestellten RX-ACK-Sammler direkt im Empfangspfad generiert. Dann werden die zusätzlich angeforderten Protokollsteuerblöcke angehängt. Anschließend folgen die angeforderten Pakete, welche durch den Puffer bereitgestellt werden. Ein Post-ACK-Block wird in den Datenstrom eingefügt, falls zwischenzeitlich noch weitere Bestätigungen für die Zieladresse gesammelt wurden oder der ACK-Block im MAC-Header nicht alle Bestätigungen aufnehmen konnte. Mit der Übergabe des MAC-Headers können auch die PHY-Parameter für die MPDU an den Basisbandprozessor übergeben werden.

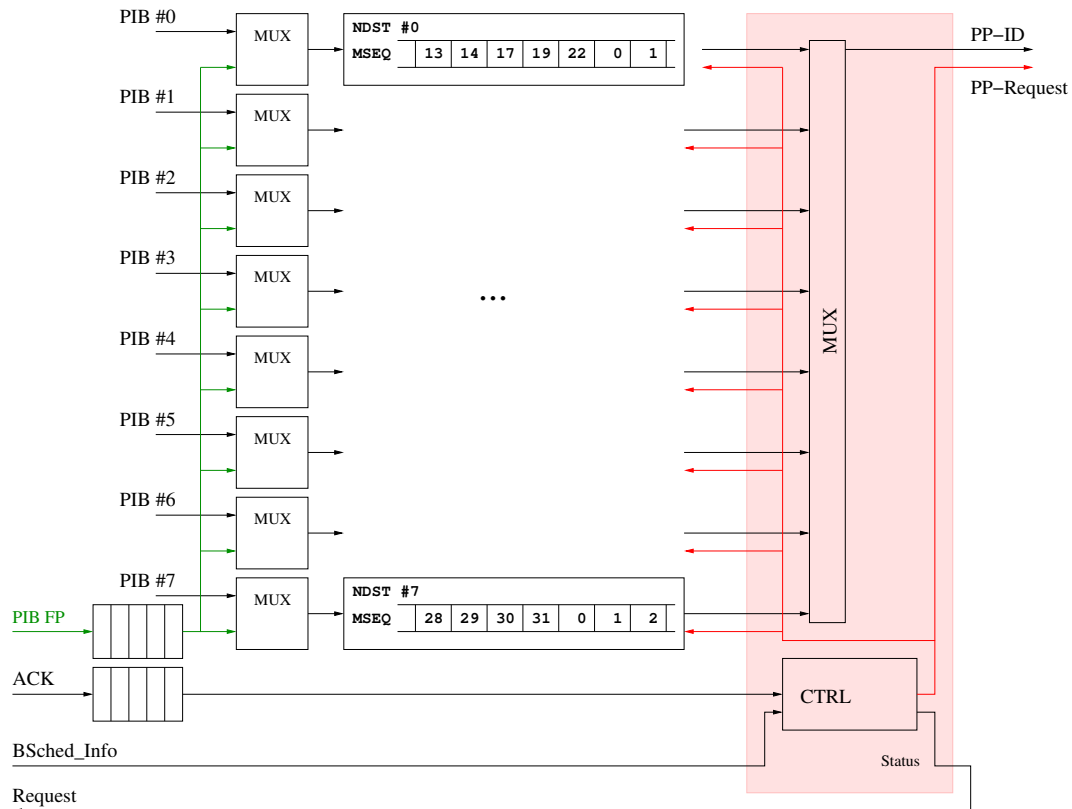


Abbildung 7.14: Architektur der Paketsendesteuerung (PSS)

### 7.4.3. Empfangspfad

Der Empfangspfad nimmt die empfangene MPDU aus dem BB entgegen. Diese wird in der *FRAME CHECK*-Komponente überprüft und Paketduplikate mit der Komponente *DUP CHECK* herausgefiltert. Anschließend wird der TTL-Zähler um eins verringert. Entspricht die MAC-Adresse der MAC-Knotenadresse der Empfängerstation wird das Paket an die Defragmentierungs- und Ausgabereinheit weitergeleitet. Andernfalls wird das Paket über den Fast-Path an den Sendepfad übergeben, wenn der TTL-Zähler nicht Null ist. Im Folgenden werden die Kernkomponenten im Detail erläutert.

#### 7.4.3.1. Überprüfung der eingehenden MPDUs

Während der Eingabe wird die Konsistenz der Datenstruktur mit der *FRAME CHECK*-Komponente überprüft. Das erfolgt mit Hilfe der Prüfsummen und der Header-Delimiter. Ein defekter Header führt zu einer Neusynchronisation auf einen der folgenden Header. Sonst müsste der Rest der MPDU verworfen werden. Jeder korrekt empfangene Protokollsteuerblock außer dem Post-ACK-Block wird an die MAC-Steuereinheit übergeben. Für jeden korrekt empfangenen Datenblock wird die Sequenznummer (MSEQ) und die Sendeadresse (MSRC) an den RX-ACK-Sammler übergeben, falls Bestätigungen angefordert wurden. Der ACK-Block aus dem MAC-Header und der Post-ACK-Block werden an die Paketsendesteuerung übergeben.

### 7.4.3.2. RX-ACK Sammler

Der RX-ACK-Sammler nimmt alle ACKs bestehend aus der Sequenznummer (MSEQ) und der Knotenadresse der Sendestation (MSRC) entgegen. Diese werden dann in eine Tabelle eingetragen. Gleichzeitig wird eine ACK-Block-Struktur für jede Zieladresse aufgebaut, die direkt in den MAC-Header oder in einen Post-ACK-Header eingefügt werden kann.

### 7.4.3.3. Duplikattabelle

Mit Hilfe der Komponente *DUP CHECK* werden doppelt empfangene Pakete herausgefiltert. Das tritt auf, wenn das Paket korrekt empfangen wurde aber das dazugehörige ACK verloren geht oder wenn Broadcast-Pakete den Knoten auf verschiedenen Wegen erreichen.

Die Duplikattabelle speichert alle eingehenden Sequenznummern (SEQ, FGNR) aus dem Aggregationsheader (AH) der Ethernet-Pakete nach ihrer Quelladresse (MSRC). Der Tabelleneintrag im Speicher wird über MSRC, SEQ und FGNR adressiert und wird gesetzt, wenn ein Paket eintrifft. Der MAC setzt das Retry-Flag (RF) im AH, wenn das Paket zum wiederholten Male ausgesendet wird. Ein gesetztes Retry-Flag führt bei einem gesetzten Tabelleneintrag zum Verwerfen des Paketes. Wird ein Paket mit einem nicht gesetzten Retry-Flag empfangen, so wird dieses nicht gefiltert, obwohl ein Tabelleneintrag gesetzt sein kann. Ein belegter Tabelleneintrag wird über einen Wrap-Around-Mechanismus abhängig von der Sequenznummer zurückgesetzt.

Jede Station benötigt  $2^{16}$  Einträge, da SEQ 12 Bit breit und FGNR 4 Bit breit sind. Befindet sich die Duplikattabelle hinter der *FRAME CHECK*-Komponente, kann die mehrfache Ausgabe und Weiterleitung von Paketen an alle Stationen verhindert werden. Dazu muss die Tabelle für jeden Knoten implementiert werden. In der vorgeschlagenen Hardwarearchitektur wird die Duplikattabelle vor dem Defragmentierungs- und Reordering-Puffer platziert, um Speicherressourcen einzusparen. An dieser Stelle werden *nur* die Duplikate für die aktuelle Station herausgefiltert.

### 7.4.3.4. Defragmentierungs- & Reordering-Puffer

Diese Komponente fügt fragmentierte Pakete wieder zusammen und gibt alle Pakete in der richtigen Reihenfolge an den Ethernet-Paket-Switch aus. Die Ausgabe in der richtigen Reihenfolge erfolgt über ein gleitendes Fenster mit Hilfe der Sequenznummern (SEQ, FGNR) im Aggregationsheader (AH) für die Ethernet-Pakete. Treffen Pakete mit Sequenznummern kleiner als dem Fensterstart ein, werden diese verworfen. Pakete mit Sequenznummern größer als das Fensterende schieben das Fenster weiter und geben eventuell Pakete im Puffer für die Ausgabe frei. Paketfragmente werden nicht ausgegeben, sondern gelöscht. Wie in Abschnitt 7.3.2 auf Seite 116 bereits erläutert kann die Wiederherstellung der Ausgabereihenfolge nicht angewendet werden, wenn Pakete über einen Paketplaner umsortiert wurden.

### 7.4.4. Steuereinheit

Die Steuereinheit vereint alle Komponenten, die die korrekte Ausführung des MAC-Protokolls sicherstellen. Nach dem Anlegen der Betriebsspannung bzw. nach einem Reset wird das System initialisiert. Die Konfigurationsdaten müssen aus einem nichtflüchtigen Speicher gelesen und an die entsprechenden Komponenten weitergeleitet werden. Im vorgestellten Beispiel wird die Konfiguration durch eine Software durchgeführt. Diese wird in einem Prozessorsubsystem des FPGAs ausgeführt.

Nach dem Laden der Konfigurationsmatrizen für die Strahlkonfigurationen und der Slotbelegung wird der Strahl auf die Standardstrahlkonfiguration gesetzt. Danach wird die Zeitbasis für den MAC-Systemtakt initialisiert. Mit dem Start des Rahmenzeitgebers im Master kann das MAC-Protokoll seine Arbeit aufnehmen.

Der Automat für die Steuerung des MAC-Protokolls basiert auf dem ereignisbasierten Automaten der Simulation aus Kapitel 6. Die ereignisbasierte Schnittstelle lässt sowohl eine Hardware- als auch eine Softwareimplementierung des Automaten zu.

### 7.4.4.1. Rahmenzeitgeber und Timer

Der Rahmenzeitgeber (*RZG*) steuert die zeitlichen Abschnitte innerhalb eines Rahmens (siehe Abschnitt 5.4.8 auf Seite 83). Der RZG enthält acht frei programmierbare Ereignisgeneratoren. Davon werden z.Z. drei benötigt. Der Erste hat die höchste Priorität und generiert das Ereignis für den Rahmenstart, der Zweite generiert die Ereignisse für die Nachbarschaftssuche während des MAC-Betriebs und der Dritte generiert die Ereignisse für die Datenslotwechsel. Die Programmierung der Ereignisgeneratoren kann entsprechend den Parametern des Medienzugriffs zur Laufzeit erfolgen.

Eine zusätzliche Komponente stellt einen Timer (*TMR*) für einmalig oder periodisch auftretende Ereignisse zur Verfügung. Der Grundaufbau entspricht dem des RZG. Der Timer wird vom MAC-Protokoll für die Überwachung von variablen Wartezeiten benötigt. Die Timer-Komponente ist für acht Einträge konfiguriert, wovon z.Z. vier verwendet werden.

Die Zeitgeber *RZG* und *TMR* werden vom MAC-Systemtakt getriggert. Ein Konfigurationsparameter erlaubt die Generierung mehrerer Ereignisse innerhalb eines Rahmens bzw. nach  $n$  Rahmen. Über einen weiteren Parameter kann die Anzahl der generierten Ereignisse limitiert werden. Wird ein Ereignis im aktuellen Rahmen nicht generiert ( $n > 1$ ), so kann das Ereignis des nächsten Generators ausgegeben werden, wenn dieser eine Startzeit innerhalb der Dauer des vorigen Ereignisses hat. Im Falle der Ausführung eines höher priorisierten Ereignisses werden Ereignisse niedrigerer Priorität verschoben bzw. ausgesetzt.

### 7.4.4.2. Zeitsynchronisation der Stationen

Der MAC-Systemtakt hat eine Granularität von 1  $\mu$ s. Alle Zeitgeber und Timer benutzen diesen Basistakt für ihre Zähler. Jede Station generiert den Takt mit ihrem eigenen Quartztaktgeber. Dieser hat eine Frequenztoleranz von bis zu  $\pm 2$  ppm, d.h. tritt bei allen Stationen ein Ereignis nach einer Sekunde ein, würden sich die Zeitpunkte um maximal  $\pm 2$   $\mu$ s unterscheiden. Die Takt drift summiert sich nach 60 Sekunden auf über 240  $\mu$ s. Wie bereits in Abschnitt 7.3.1 auf Seite 115 ausgeführt wurde, ist eine Zeitsynchronisation der Stationen notwendig, um einen interferenzfreien Medienzugriff mit TDMA im Multi-Hop-Betrieb sicherzustellen. Deshalb erhalten alle Stationen, in einer Konfiguration mit acht Nachbarstationen, nach höchstens acht Rahmen ein Beacon u.a. für die Zeitsynchronisation, d.h. alle 8 ms bei einer Rahmendauer von 1 ms und acht Datenslots. Die maximale Takt drift beträgt dann  $\pm 30$  ns. Die Zeit ist in der Schutzzeit  $T_{GT}$  berücksichtigt.

In der vorgestellten Hardware ist ein temperatur-kompensierter und spannungsgesteuerter Taktoszillator<sup>90</sup> vorgesehen. Nach dem Erhalt mehrerer Beacons ( $> 1$ ) kann die Takt drift bestimmt werden. Die Differenz aus der erwarteten und der tatsächlichen Ankunftszeit des Beacons wird gemittelt und basierend darauf wird der Takt des TCVCXOs nachgestellt. Dieser Vorgang der Angleichung der Frequenzen wird als Syntonization bezeichnet.

<sup>90</sup>TCVCXO - Temperature Compensated Voltage Controlled Crystal Oscillator

## 7. Hardwareintegrationsaspekte

Steht kein TCVCXO zur Verfügung, kann die Zeitsynchronisierung über den 1  $\mu$ s-Takt angepaßt werden. Gewöhnlich wird dieser Takt über Zähler generiert. Entsprechend der Abweichung des 1  $\mu$ s-Taktes vom *Ideal* kann die Anzahl der Takte des Zählers variiert werden.

Zur Synchronisierung der Frequenzen zwischen mehreren Stationen gibt es standardisierte Verfahren. Das *SyncE*-Verfahren [75–81] stellt Frequenzgleichheit über eine Ethernet-Verbindung her. Kann aus der drahtlosen Modulation der Datentakt zurückgewonnen werden, so kann dieser mit Hilfe zusätzlicher integrierter Schaltkreise für die Taktgenerierung und -nachführung genutzt werden. Mit dem *IEEE-Standard 1588* [82] steht ein paketbasiertes Verfahren für die Phasen- und Zeitanpassung zur Verfügung. Voraussetzung ist die Möglichkeit, einen Zeitstempel bei der Ankunft und beim Verlassen über die Netzwerkschnittstellen (Ethernet-PHY, Basisbandprozessor) in den Paketen zu aktualisieren. Dies wird in der drahtgebundenen Hardware durch entsprechende Ethernet-PHYs unterstützt. Bei der drahtlosen Übertragung muss der digitale Basisbandprozessor einen Zeitstempel basierend auf dem Ankunfts- und Ausgangszeitpunkt der Präambel setzen. Die Taktanpassung erfolgt, nach der Auswertung der Laufzeiten aus den Zeitstempeldifferenzen, durch die Nachführung der Frequenz eines Taktgebers und durch die Bereitstellung eines Korrekturfaktors für die interne Uhr.

### 7.4.5. PHY Layer Convergence Protocol

Die PLCP-Schnittstelle verbindet den MAC mit dem Basisbandprozessor. Für beide Module hat diese Schnittstelle eine definierte Funktionalität. Das ermöglicht den Wechsel der Module ohne Hardwareanpassungen am anderen Modul vornehmen zu müssen. Neben den ein- und ausgehenden Datenpaketen werden auch Steuerinformationen übertragen. Weiterhin werden Funktionen zum Schreiben und Lesen über eine Speicherschnittstelle bereitgestellt.

## 7.5. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zwei Single-Hop-Demonstratoren für spezielle Kabelersatzszenarien vorgestellt. Beide Demonstratoren basieren auf in Hardware implementierte MAC-Protokolle.

Der erste Demonstrator verbindet ein Multimediaterminal im Sitz eines Flugzeuges drahtlos mit dem Entertainmentsystem. Die Verbindung wird über zwei redundante gerichtete Punkt-zu-Punkt-Verbindungen im 60-GHz-Band hergestellt, um die Blockade einer Verbindung überbrücken zu können. Der Demonstrator wurde erfolgreich in einem Flugzeug-Mockup getestet.

Der zweite Demonstrator eignet sich besonders für hochratige Punkt-zu-Punkt-Verbindungen mit kurzen Übertragungslatenzen. Als Testanwendung wurde die Videoübertragung mit einer industriellen HD-Videokamera gewählt. Die Messungen bestätigen die Funktion des Kommunikationssystems. Übertragungswiederholungen in der MAC-Schicht verhindern, dass die internen Fehlerkorrekturmechanismen der Kamera aktiv werden.

Die vorgestellte MAC-Hardwarearchitektur unterstützt die geforderten Eigenschaften wie Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen, Multi-Hop-Betrieb und kurze Übertragungslatenzen. Abhängig von den zur Verfügung stehenden Hardwareressourcen lassen sich z.B. die Größe des Paketpuffers und die Anzahl der unterstützten Nachbarstationen anpassen.

Eine Anwendungsschnittstelle für den Zugriff auf den Übertragungskanal erlaubt die Integration zusätzlicher Funktionalität. Dazu wurde ein Entfernungsmeßverfahren vollständig in Hardware integriert. So lässt sich die Entfernung der beiden Stationen während



der Datenübertragung bestimmen.

Die Funktionalität und Leistungsfähigkeit aller Komponenten wurden in einer realen Umgebung getestet und evaluiert. Auf dieser Grundlage wurde eine Hardwarearchitektur für das in Kapitel 5 vorgestellte MAC-Protokoll detailliert erläutert. Die ereignisbasierte Arbeitsweise erlaubt die Implementierung der MAC-Protokollsteuerung sowohl in Hardware als auch in Software.



## 8. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein hardware-implementierbares MAC-Protokoll für hochratige und latenzarme drahtlose Verbindungen vorgestellt. Es werden sowohl Punkt-zu-Punkt- als auch Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen unterstützt. Die Routing-Funktionalität erlaubt die Weiterleitung von Paketen über Zwischenknoten. Folgende Anforderungen wurden an das MAC-Protokoll gestellt: hohe Datenraten bei geringen Übertragungslatenzen, Unterstützung mehrerer Teilnehmer im Single- und Multi-Hop-Betrieb sowie die Hardwareimplementierbarkeit.

Die Datenübertragung über größere Entfernungen erfordert im 60-GHz-mmWave-Band hochdirektionale Antennen. Dazu müssen die Antennen der Stationen aufeinander ausgerichtet werden, um eine Kommunikationsverbindung aufbauen zu können. Mit Hilfe elektronisch verstellbarer Antennen (Smart-Antennas) erfolgt die Verbindungseinrichtung über das zum Patent angemeldete automatische Verfahren zur Antennenausrichtung und Sendeleistungsregulierung. Das Verfahren erlaubt die initiale Nachbarschaftssuche für Stationen mit unbekannter Ausrichtung und unbekannter Distanz.

Der Medienzugriff erfolgt mit dem wettbewerbsfreien Polling-Verfahren, bei dem immer nur zwei Teilnehmer miteinander kommunizieren und der Datendurchsatz respektive die Dienstgütekriterien so leichter sichergestellt werden können. Sind mehrere Stationen erreichbar, werden diese zusätzlich über das TDMA-Verfahren bedient. Smart-Antennas ermöglichen eine schnelle Umschaltung der Antennenstrahlausrichtung. Hochdirektionale Verbindungen mit Pencil-Beams haben eine geringe Reichweite außerhalb des Strahls. Das ermöglicht einen dichteren Abstand weiterer Kommunikationsverbindungen, ohne dass eine Interferenz zwischen den gleichzeitigen Übertragungen auftritt. Das erhöht die Kanalkapazität und somit auch den erreichbaren Datendurchsatz. Mit Hilfe einer Belegungsvorschrift wird das Medium zeitlich und räumlich unter den Teilnehmern aufgeteilt. Zum Beginn eines Slots werden die Antennenstrahlausrichtungen für alle Teilnehmerpaare eingestellt. In Szenarien mit redundanten Verbindungen können die Pakete beim Ausfall einer Verbindung über eine alternative Verbindung umgeleitet werden. Die Detektion einer gestörten Verbindung erfolgt mit Hilfe der Nachbarstationen. Diese melden den Ausfall an den Master. Dieser weist allen betroffenen Stationen eine alternative Belegungsvorschrift zu. Nach der Wiederherstellung der gestörten Verbindung wird die Standardverbindungs-vorschrift wieder eingesetzt.

Ein hoher Datendurchsatz wird durch die Reduzierung des MAC- und PHY-Overheads erreicht. Im eingesetzten OFDM-Basisbandprozessor setzt sich der PHY-Overhead aus der Dauer der Präambel und einer Verzögerung der Datenausgabe durch die Verarbeitungsalgorithmen zusammen. Eine Aggregation der Datenpakete auf MAC-Ebene vergrößert die Länge der PHY-Frames. Dadurch wird die Anzahl der PHY-Frames reduziert und somit auch die Anzahl der Präambeln. Mehrere PHY-Frames können direkt hintereinander gesendet werden, ohne auf eine Bestätigung zu warten. Dadurch wird die Ausgabelatenz der dekodierten Daten bis auf die des letzten PHY-Frames verborgen.

Die Fehlerkorrektur im MAC erfolgt über eine selektive Übertragungswiederholung von Paketen von Knoten zu Knoten. Die Bestätigungen der empfangenen Pakete werden gesammelt und mit dem nächsten Datenpaket zurückgesendet. Die Bestätigungen werden im MAC-Header oder im Post-ACK-Block übertragen.

Das Kontroll- und Datenformat des MAC-Protokolls wurde für die einfache Verarbeitung in einer Hardware entworfen. Jedes Datenpaket wird mit einem Aggregationsheader versehen, der alle relevanten Informationen für die Weiterleitung des Paketes zum Zielknoten enthält. Ist ein Abschnitt der empfangenen Daten während der Übertragung zerstört

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

worden, erfolgt eine Synchronisierung auf den nächsten Aggregationsheader. Damit wird verhindert, dass der Rest der MPDU verworfen werden muss und so die Paketfehlerrate unnötig erhöht wird. Pakete können in Fragmente zerlegt werden. Der erste Vorteil der Fragmentierung ist die Anpassung der Größe an die internen Strukturen. Der zweite Vorteil ist Reduzierung der Paketfehlerrate in einem gestörten Kanal. Eine Übertragungswiederholung der fehlerhaften Fragmente erzeugt außerdem weniger Last als die Übertragungswiederholung des ganzen Paketes.

Das MAC-Protokoll unterstützt eine Anwendungsschnittstelle für den direkten Zugriff auf den Übertragungskanal. Dazu können Funktionsmodule in der PHY-Schicht integriert werden, die über Multiplexer an die AD- und DA-Wandler der analogen Schnittstelle geschaltet werden. Der MAC übernimmt die Steuerung des Kanalzugriffs der beteiligten Stationen, parametrisiert das ausgewählte Funktionsmodul und fordert nach Beendigung der Operation die Ergebnisdaten an. Die Anwendung kann auf die Parameter und die Ergebnisse über die Speicherschnittstelle des Ethernet-Switches zugreifen.

Umfangreiche Simulationen bestätigen die Funktion des vorgestellten MAC-Protokolls. Die Stationen können frei in einem dreidimensionalen Raum platziert werden. Alle auf dem Link-Budget basierenden Effekte des Kanals wie die Entfernung der Stationen, die Antennenstrahlausrichtung zwischen den Stationen sowie die Sendeleistung werden über die Bitfehlerrate abgebildet. Diese wird abhängig vom resultierenden Signal-Rausch-Abstand des Link-Budgets und der PHY-Datenrate aus den Ergebnissen der OFDM-PHY-Systemsimulation entnommen. Dadurch werden auch Kanaleffekte wie Rauschen, Fading und Mehrwegeausbreitung berücksichtigt.

Blockaden können während der Simulation frei im Raum platziert bzw. bewegt werden. Eine Verbindungsunterbrechung wird mit einer Bitfehlerrate von 100% emuliert. Das Zeitverhalten des digitalen OFDM-Basisbandprozessors wird ebenso wie die Signallaufzeiten berücksichtigt.

Es wurden mehrere Demonstratoren für verschiedene Anwendungsszenarien aufgebaut. Diese enthalten jeweils speziell auf das Szenario entworfene MAC-Protokolle, die als Hardware in FPGAs integriert wurden. Die Performanz wurde unter realen Einsatzbedingungen evaluiert. Auf der Grundlage der evaluierten Hardwarestrukturen wurde eine Hardwarearchitektur für das vorgeschlagene MAC-Protokoll entworfen. Dabei wurde besonders auf die Aspekte des Ressourcenverbrauchs und der Reduzierung des Verarbeitungsoverheads geachtet. Wichtige Architekturdetails wurden bereits in der Simulation berücksichtigt. Alle vorgestellten Szenarien können mit dieser Architektur entsprechend ihren Anforderungen bedient werden. Das MAC-Protokoll bietet sowohl für das Punkt-zu-Punkt-Kabelersatzszenario als auch für das Punkt-zu-Mehrpunkt-Szenario einen hohen Datendurchsatz mit geringen Übertragungslatenzen. Die speziell beim Multi-Hop-Straßenzugszenario (Daisy-Chain) auftretenden höheren akkumulierten Übertragungslatenzen werden über das Medienzugriffsverfahren und die Erweiterungen der Hardwarearchitektur reduziert.

Für zukünftige Weiterentwicklungen ist die starre Implementierung des MAC-Steuerungsautomaten insofern ungünstig, als das Ablaufänderungen eine Neuerstellung des Hardwaredesigns erfordern. Es ist zu überprüfen, inwieweit die Steuerung über eine Softwareimplementierung erfolgen kann. Dafür wurde bereits eine Schnittstelle integriert, die dem Prozessor alle wichtigen Ereignisse für die Protokollsteuerung bereitstellt.

## Abbildungsverzeichnis

1.1. Internationale Frequenzregulierung im 60-GHz-Band . . . . .	4
2.1. Nachrichtenübertragungssystem . . . . .	10
2.2. Drahtloses Nachrichtenkommunikationssystem . . . . .	10
2.3. OSI-Schichtenmodell mit Erweiterung für Telekommunikationsdienste . . .	13
2.4. ISO-Referenzmodell des IEEE 802.11 Standards [7] . . . . .	14
2.5. Konstellationsdiagramme für QPSK und 16-QAM mit/ohne Kanal . . . . .	14
2.8. Typische Netzwerktopologien für drahtlose Szenarien . . . . .	17
2.6. Kanalgewinn und SNR (über kurze und lange Distanz) . . . . .	20
2.7. FER vs. $E_b N_0$ - Simulation EASY-A Basisbandprozessor mit CM1.2-Kanalmodell aus dem Standard IEEE 802.15.3c . . . . .	21
3.1. Weiterleitung eines Paketes über den Traffic-Shaper und den Paketplaner .	26
3.2. Schichtenweise Datenkapselung . . . . .	27
3.3. DCF mit IFS und NAV [7] . . . . .	33
3.4. IEEE 802.11ad: Beispiel für Zugriffsperioden im Beaconintervall [41] . . . .	38
3.5. IEEE 802.11: Modell der EDCA-Referenzimplementierung [7] . . . . .	38
3.6. IEEE 802.11: IFS Verhältnisse [7] . . . . .	39
3.7. IEEE 802.15.3c Piconet Superframe-Struktur im Quasi-Omni-Modus [39] .	41
3.8. ECMA-387: Superframe [38] . . . . .	42
3.9. Systemarchitektur . . . . .	46
4.1. Resultierende Latenzen aus dem PHY- und MAC-Overhead . . . . .	49
4.2. MAC- und PHY-Zeitverhalten beim Senden und Empfangen eines PHY- Frames (Simulation der Hardwareimplementierung) . . . . .	50
4.3. Wirkung von $T_{TXdel}$ und $T_{RXdel}$ auf den Datenfluss . . . . .	53
4.4. Aggregations- und Bestätigungsverfahren . . . . .	54
4.5. MAC-Datendurchsatz und Effizienz in Abhängigkeit von der PHY-Datenrate	55
4.6. MAC-Datendurchsatz in Abhängigkeit von der Paketlänge und der Bitfeh- lerrate bei einer PHY-Datenrate von 1,3 GBit/s . . . . .	59
4.7. MAC-Datendurchsatz in Abhängigkeit von der Paketlänge und der Bitfeh- lerrate bei einer PHY-Datenrate von 3,9 GBit/s . . . . .	60
5.1. komplexes Szenario: Punkt-zu-Punkt-, Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen im Single- und Multi-Hop-Betrieb . . . . .	64
5.2. Übersicht der Komponenten des Kommunikationssystems . . . . .	66
5.3. MAC-Rahmenstruktur im Punkt-zu-Mehrpunkt-Betrieb . . . . .	84
5.4. Punkt-zu-Mehrpunkt Szenarien . . . . .	87
5.5. MAC-Rahmenstruktur im Punkt-zu-Punkt-Betrieb mit Algorithmus-Slot .	89
5.6. Detaillierte Übersicht des Daten- und ACK-Transports mit einem „Stagge- red Schedule“ (versetzt/verschränkt) im Daisy-Chain-Szenario . . . . .	91
6.1. Dämpfungsverlauf bei 2° Öffnungswinkel . . . . .	98
6.2. Antennenstrahlausrichtung . . . . .	98
6.3. Blockierte Verbindung . . . . .	99
6.4. Beispielszenarien der Systemsimulation . . . . .	101
6.5. Simulationsergebnisse für das Punkt-zu-Punkt-Szenario mit einer PHY- Datenrate von 2,6 GBit/s . . . . .	104
6.6. Simulationsergebnisse für das Daisy-Chain-Szenario mit einer PHY-Datenrate von 2,6 GBit/s . . . . .	105
7.1. Gigabit-Demonstrator mit redundanter Verbindung . . . . .	108
7.2. MAC-Systemübersicht Gigabit-Demonstrator . . . . .	109

7.3. Multi-Gigabit-Demonstrator für Kabelersatzlösungen über eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung . . . . .	111
7.4. MAC-Systemübersicht Multi-Gigabit-Demonstrator . . . . .	112
7.5. Frame- und Paketfehlerrate in Abhängigkeit von der Entfernung bei einer PHY-Datenrate von 1,3 GBit/s . . . . .	113
7.6. Hardwarestrukturübersicht der MAC- und der PHY-Schicht mit zusätzlicher Hardwarefunktionalität . . . . .	114
7.7. Systemübersicht des MAC für Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen und Multi-Hop-Funktionalität . . . . .	121
7.8. Verschiedene MAC-Implementierungen in einem Prozessorsystem . . . . .	122
7.9. Vierport-Ethernet-Switch mit ARP- und UDP-Server . . . . .	123
7.10. Architektur des Blockspeichers (BM) . . . . .	127
7.11. Architektur des Paketpuffers (PP) . . . . .	129
7.12. Architektur des Paketplaners (PS) für den Eingangspfad (Ethernet) . . . . .	131
7.13. Architektur des Paketplaners (PS) für den Weiterleitungspfad (Fast-Path) . . . . .	132
7.14. Architektur der Paketsendesteuerung (PSS) . . . . .	133
B.1. MAC-Datendurchsatz BPSK-1/2 . . . . .	161
B.2. MAC-Datendurchsatz Imm-ACK BPSK-1/2 . . . . .	161
B.3. MAC-Datendurchsatz Del-ACK 4 BPSK-1/2 . . . . .	162
B.4. MAC-Datendurchsatz Blk-ACK 4 BPSK-1/2 . . . . .	162
B.5. MAC-Datendurchsatz QPSK-1/2 . . . . .	163
B.6. MAC-Datendurchsatz Imm-ACK QPSK-1/2 . . . . .	163
B.7. MAC-Datendurchsatz Del-ACK 4 QPSK-1/2 . . . . .	164
B.8. MAC-Datendurchsatz Blk-ACK 4 QPSK-1/2 . . . . .	164
B.9. MAC-Datendurchsatz 16-QAM-1/2 . . . . .	165
B.10. MAC-Datendurchsatz Imm-ACK 16-QAM-1/2 . . . . .	165
B.11. MAC-Datendurchsatz Del-ACK 4 16-QAM-1/2 . . . . .	166
B.12. MAC-Datendurchsatz Blk-ACK 4 16-QAM-1/2 . . . . .	166
B.13. MAC-Datendurchsatz 16-QAM-3/4 . . . . .	167
B.14. MAC-Datendurchsatz Imm-ACK 16-QAM-3/4 . . . . .	167
B.15. MAC-Datendurchsatz Del-ACK 4 16-QAM-3/4 . . . . .	168
B.16. MAC-Datendurchsatz Blk-ACK 4 16-QAM-3/4 . . . . .	168
B.17. MAC-Datendurchsatz bei einer PHY-Datenrate von 1,3 GBit/s bei einer $BER = 6,13 \cdot 10^{-8} \cong FER = 7,6 \cdot 10^{-3}$ . . . . .	169
B.18. PHY-Framedauer . . . . .	169
C.1. QPSK-1/2 $N = 2048$ Bytes . . . . .	171
C.2. QPSK-1/2 $N = 4096$ Bytes . . . . .	171
C.3. QPSK-1/2 $N = 8192$ Bytes . . . . .	172
C.4. QPSK-1/2 $N = 16384$ Bytes . . . . .	172
C.5. 16-QAM-1/2 $N = 2048$ Bytes . . . . .	173

## Tabellenverzeichnis

3.1. Mapping zwischen 802.11e Access Categories (ACs) und 802.1Q CoS . . . . .	25
3.2. Übersicht der 60 GHz-Standards (fett) mit ihren „Vorgängern“ . . . . .	37
3.3. IEEE 802.11: Default EDCA Parameter für alle ACs [7] . . . . .	39
3.4. IEEE 802.11ad: PHY-Übersicht . . . . .	40
3.5. IEEE 802.15.3c: PHY-Übersicht . . . . .	42
3.6. ECMA-387: PHY-Übersicht . . . . .	43
3.7. WirelessHD: OFDM-PHY-Übersicht . . . . .	44
4.1. EASY-A OFDM-PHY- und MAC-Parameter . . . . .	58
4.2. Berechnung von $S$ und $E$ mit verschiedenen Bestätigungsverfahren und PHY-Datenraten . . . . .	59
5.1. Übersicht von Publikationen verfügbarer 60-GHz-Demonstratoren und kom- merzieller Angebote (nicht bekannt “-”) . . . . .	67
5.2. SPI- und VM-Basisparameter . . . . .	69
5.3. SPI-Konfigurationszeiten für $N_{VM} = 8$ . . . . .	69
5.4. Maximale Ausführungszeiten für den Strahlsuchalgorithmus in <i>Phase 1 &amp; 2</i> . . . . .	74
5.5. Maximale Ausführungszeiten der Suche einer neuen Station bei laufendem MAC-Protokoll . . . . .	75
5.6. Verbindungs- und Slotbelegungsmatrix für das Punkt-zu-Mehrpunkt-Szenario . . . . .	77
5.7. Verbindungs- und Slotbelegungsmatrix für das Straßenzugszenario (Daisy- Chain) . . . . .	77
5.8. Verbindungs- und Slotbelegungsmatrix für Szenario aus Abbildung 5.4b . . . . .	78
5.9. Fragmentfolgestruktur mit einer Fragmentlänge von 2048 Bytes . . . . .	81
5.10. Datendurchsatz abhängig von der Anzahl der Slaves $T_{UP} : T_{DOWN} = 1 : 3$ . . . . .	86
5.11. MAC-Protokoll: MPDU-Formate . . . . .	92
5.12. MAC-Protokoll: Daten- und Post-ACK-Block . . . . .	92
5.13. MAC-Protokoll: Beacon-, Schedule- und Info-Block . . . . .	93
7.1. FPGA-Ressourcenverbrauch Gigabit-Demonstrator . . . . .	109
7.2. FPGA-Ressourcenverbrauch Multi-Gigabit-Demonstrator . . . . .	110
7.3. Meßparameter . . . . .	112
7.4. Funktionsblöcke für Paketverarbeitung . . . . .	118
7.5. Paketinformationsblock (PIB) . . . . .	126
7.6. Übersicht über die Verwaltungsressourcen des Blockspeichers . . . . .	128
A.1. EASY-A OFDM-Basisbandprozessor: PHY-Datenraten . . . . .	153
A.2. MAC-Protokoll: Variablen . . . . .	153
A.3. MAC-Protokoll: Konstanten . . . . .	153
A.4. Slotbelegung mit Blockierung . . . . .	159

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

$\lambda$ .....	Wellenlänge
$E_b/N_0$ .....	energy per bit to noise power spectral density ratio
$c_0$ .....	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum $c_0 = 299792458 \text{ m/s}$
<b>ACK</b> .....	ACKnowledgement
<b>ACM</b> .....	adaptive coding and modulation
<b>ADC</b> .....	Analog-to-Digital Converter
<b>AES</b> .....	Advanced Encryption Standard
<b>AFE</b> .....	Analoges Frontend
<b>ARP</b> .....	Address Resolution Protocol
<b>ARQ</b> .....	Automatic Repeat reQuest
<b>ASIC</b> .....	Application-Specific Integrated Circuit
<b>BCC</b> .....	Binary Convolutional Code
<b>BER</b> .....	Bit Error Rate
<b>BPSK</b> .....	Binary Phase Shift Keying Binäre Phasenumtastung
<b>CBC-MAC</b> ...	Cipher Block Chaining Message Authentication Code
<b>CC</b> .....	Convolutional Coding
<b>CCA</b> .....	Clear Channel Assessment
<b>CCMP</b> .....	Counter-Mode/CBC-MAC Protocol
<b>CDMA</b> .....	Code Division Multiplex Access
<b>CNR</b> .....	Carrier-to-Noise Ratio
<b>COFDM</b> .....	Coded Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
<b>CoS</b> .....	Class of Service (802.1q)
<b>CRC</b> .....	Cyclic Redundancy Check
<b>CSMA/CA</b> ...	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
<b>CTS</b> .....	Clear-To-Send
<b>DAC</b> .....	Digital-to-Analog Converter
<b>dB</b> .....	Dezibel
<b>DBPSK</b> .....	Differential Binary Phase Shift Keying Differentielle Binäre Phasenumtastung
<b>DCF</b> .....	Distributed Coordination Function
<b>DCM</b> .....	Dual Carrier Modulation (ECMA)
<b>DiffServ</b> .....	Differentiated Services (IPv4/IPv6)
<b>DP</b> .....	Display Port
<b>DSL</b> .....	Digital Subscriber Line
<b>DVI</b> .....	Digital Visual Interface
<b>DVRP</b> .....	Distance Vector Routing Protocol
<b>EDCA</b> .....	Enhanced Distributed Channel Access
<b>EIRP</b> .....	Equivalent isotropically radiated power Äquivalente isotrope Strahlungsleistung
<b>ETSI</b> .....	European Telecommunications Standards Institute Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen
<b>FCC</b> .....	Federal Communications Commission
<b>FDD</b> .....	Frequency Division Duplex
<b>FDMA</b> .....	Frequency Division Multiplex Access
<b>FEC</b> .....	Forward Error Correction - Vorwärtsfehlerkorrektur
<b>FER</b> .....	Frame Error Rate



<b>FTTH</b>	.....	Glasfaser - Fibre To The Home
<b>HARQ</b>	.....	Hybrid Automatic Repeat Request
<b>HCCA</b>	.....	HCF Controlled Channel Access
<b>HCF</b>	.....	Hybrid Coordination Function
<b>HDMI</b>	.....	High-Definition Multimedia Interface
<b>ICMP</b>	.....	Internet Control Message Protocol
<b>IEEE</b>	.....	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IP</b>	.....	Internet Protocol
<b>LAN</b>	.....	Local Area network
<b>LDPC</b>	.....	Low-Density Parity-Check
<b>LOS</b>	.....	Line-Of-Sight (Sichtverbindung)
<b>LTE</b>	.....	Long Term Evolution
<b>LTE</b>	.....	Long-Term Evolution
<b>MAC</b>	.....	Medium Access Control
<b>MC</b>	.....	Multi Carrier
<b>MIMO</b>	.....	Multiple-In Multiple-Out
<b>MLME</b>	.....	MAC Sublayer Management Entity (IEEE convention)
<b>MPDU</b>	.....	MAC Protocol Data Unit (IEEE convention)
<b>MSDU</b>	.....	MAC SDU (IEEE convention)
<b>NACK</b>	.....	Negative ACKnowledgement
<b>NLOS</b>	.....	Non-Line-Of-Sight (Nicht-Sichtverbindung)
<b>OFDM</b>	.....	Orthogonal Frequency Division Multiplex Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren
<b>OSI</b>	.....	Open Systems Interconnection
<b>P-t-MP</b>	.....	Point-to-MutiPoint
<b>P-t-P</b>	.....	Point-to-Point
<b>PCF</b>	.....	Point Coordination Function
<b>PCIE</b>	.....	Peripheral Component Interconnect express
<b>PCP</b>	.....	Priority Code Point (802.1p/q)
<b>PDD</b>	.....	Polarization Division Duplex
<b>PDU</b>	.....	Protocol Data Unit (IEEE convention)
<b>PER</b>	.....	Packet Error Rate
<b>PLCP</b>	.....	PHY Layer Convergence Protocol (IEEE convention)
<b>PLME</b>	.....	PHY Sublayer Management Entity (IEEE convention)
<b>PPDU</b>	.....	PLCP PDU (IEEE convention)
<b>PSDU</b>	.....	PLCP SDU (IEEE convention)
<b>PSK</b>	.....	Phase Shift Keying - Phasenumtastung
<b>QAM</b>	.....	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QoS</b>	.....	Quality of Service
<b>QPSK</b>	.....	Quadrature Phase Shift Keying - Quadraturphasenumtastung
<b>RS</b>	.....	Reed-Solomon
<b>RSVP</b>	.....	Resource reSerVation Protocol
<b>RTS</b>	.....	Ready-To-Send
<b>RX</b>	.....	Receive
<b>SAP</b>	.....	Service Access Point (IEEE convention)
<b>SATA</b>	.....	Serial Advanced Technology Attachment
<b>SC</b>	.....	Single Carrier
<b>SCBT</b>	.....	Single Carrier Block Transmission (ECMA)
<b>SDMA</b>	.....	Space Division Multiplex Access

## *Symbol- und Abkürzungsverzeichnis*

<b>SDU</b> .....	Service Data Unit (IEEE convention)
<b>SME</b> .....	Station Management Entity (IEEE convention)
<b>SNR</b> .....	Signal-to-Noise Ratio
<b>STBC</b> .....	Space Time Block Code
<b>tbd</b> .....	to be define - noch zu definieren
<b>TCM</b> .....	Trellis Coded Modulation
<b>TCP</b> .....	Transport Control Protocol
<b>TCVCXO</b> ....	Temperature-Compensated Voltage-Controlled Crystal Oscillator
<b>TDD</b> .....	Time Division Duplex
<b>TDMA</b> .....	Time Division Multiplex Access
<b>TKIP</b> .....	Temporal Key Integrity Protocol
<b>ToS</b> .....	Type of Service (IPv4)
<b>TX</b> .....	Transmit
<b>TXOP</b> .....	Transmit Opportunity
<b>UDP</b> .....	User Datagram Protocol
<b>UMTS</b> .....	Universal Mobile Telecommunications System
<b>USB</b> .....	Universal Serial Bus
<b>VLAN</b> .....	Virtual Local Area Network
<b>WLAN</b> .....	Wireless Local Area network
<b>WPAN</b> .....	Wireless Personal Area network
<b>WWW</b> .....	World Wide Web

## Literatur

- [1] M. Ehrig, M. Petri, V. Sark, and E. Grass, "Combined high-resolution ranging and high data rate wireless communication system in the 60 GHz band," in *WPNC 2014*, pp. 1–6, 2014.
- [2] M. Ehrig and M. Petri, "60 GHz broadband MAC system design for cable replacement in machine vision applications," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 67, Aug. 2013.
- [3] M. Petri and M. Ehrig, "Verfahren zur automatischen Antennenausrichtung und Sendeleistungsregulierung und Richtfunksystem," 2013.
- [4] M. Ehrig and M. Petri, "60 GHz Wireless Broadband Cable Replacement for Machine Vision Applications," *issse*, pp. 1–6, 2012.
- [5] V. Ziegler, B. Schulte, J. Sabater, S. Bovelli, J. Kunisch, K. Maulwurf, M. Martinez-vazquez, S. Member, C. Oikonomopoulos-zachos, S. Glisic, M. Ehrig, and E. Grass, "Broadband 57-64GHz WLAN communication system integrated into an aircraft cabin," *Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International*, pp. 1–10, 2012.
- [6] C.-S. Choi, M. Piz, M. Ehrig, and E. Grass, *60GHz Technology for Gbps WLAN and WPAN: from Theory to Practice - Gbps OFDM Baseband Design und Implementation for 60 GHz Wireless LAN Applications*. John Wiley & Sons, 2011.
- [7] "IEEE802.11-2012 - Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," March 2012.
- [8] R. Mäusl and J. Göbel, *Analoge und digitale Modulationsverfahren*. Hüthig Heidelberg, 2002.
- [9] K. D. Kammeyer, *Nachrichtenübertragung*. Vieweg+ Teubner, 5. auflage ed., 2011.
- [10] "IEEE802.15.3c WPAN Task Group (TG3c) Contributions and documents," tech. rep., Computer Society, 2007.
- [11] B. Sklar, *Digital communications*, vol. 1099. Prentice Hall PTR New Jersey, 2nd ed., 2001.
- [12] J. Schiller, *Mobilkommunikation–Techniken für das allgegenwärtige Internet. 2000*. Addison Wesley, 2000.
- [13] P. Jung, *Analyse und Entwurf digitaler Mobilfunksysteme*. Springer DE, 1997.
- [14] M. Petri, *Latenzverringierung in Basisbandprozessoren am Beispiel eines hochratigen OFDM-Kommunikationssystems*. Phd, BTU Cottbus, 2012.
- [15] C. S. R. Murthy and B. Manoj, *Ad hoc wireless networks: Architectures and protocols*. Pearson education, 2008.
- [16] A. S. Tanenbaum, *Computer networks*. Prentice-Hall Englewood Cliffs (NY), 5th ed., 2011.
- [17] M. Shreedhar and G. Varghese, "Efficient fair queuing using deficit round-robin," *Networking, IEEE/ACM ...*, 1996.

- [18] A. Nikologiannis, I. Papaefstathiou, G. Kornaros, and C. Kachris, “An FPGA-based queue management system for high speed networking devices,” *Microprocessors and Microsystems*, vol. 28, pp. 223–236, Aug. 2004.
- [19] C. Kachris and S. Vassiliadis, “A Dynamically Reconfigurable Queue Scheduler,” ... *Logic and Applications, 2006. FPL’06 ...*, 2006.
- [20] A. Viterbi, “Convolutional codes and their performance in communication systems,” *Communication Technology, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 5, pp. 751–772, 1971.
- [21] R. Gallager, “Low-density parity-check codes,” *Information Theory, IRE Transactions on*, vol. 8, no. 1, pp. 21–28, 1962.
- [22] H. Klimant, R. Piotraschke, and D. Schönfeld, *Informations-und Kodierungstheorie*. Springer DE, 2006.
- [23] “IEEE802.3-2008: Carrier sense multiple access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications,” December 2008.
- [24] N. Abramson, “THE ALOHA SYSTEM: another alternative for computer communications,” tech. rep., 1970.
- [25] L. G. Roberts, “ALOHA packet system with and without slots and capture,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1975.
- [26] P. Karn, “MACA-a new channel access method for packet radio,” in *ARRL/CRRL Amateur radio 9th computer networking conference*, vol. 140, pp. 1–5, 1990.
- [27] V. Bharghavan, A. Demers, and S. Shenker, “MACAW: a media access protocol for wireless LAN’s,” *ACM SIGCOMM*, pp. 212–225, 1994.
- [28] K. Kobayashi and M. Nakagawa, “Spatially divided channel scheme using sectored antennas for CSMA/CA ’directional CSMA/CA’,” *Personal, Indoor and Mobile ...*, 2000.
- [29] R. Choudhury, “On designing MAC protocols for wireless networks using directional antennas,” ... *IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 5, pp. 477–491, 2006.
- [30] M. X. Gong, D. Akhmetov, R. Want, and S. Mao, “Multi-User Operation in mmWave Wireless Networks,” *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, June 2011.
- [31] “IEEE802.11ac/D2.0-2012: Amendment: Enhancements for Very High Throughput for operation in bands below 6GHz,” January 2012.
- [32] S. Singh, F. Ziliotto, U. Madhow, E. Belding, and M. Rodwell, “Blockage and directivity in 60 GHz wireless personal area networks: from cross-layer model to multihop MAC design,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, pp. 1400–1413, Oct. 2009.
- [33] S. Singh, R. Mudumbai, and U. Madhow, “Interference Analysis for Highly Directional 60-GHz Mesh Networks: The Case for Rethinking Medium Access Control,” *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 19, no. 99, pp. 1–1, 2010.

- [34] J. Qiao, L. X. Cai, X. S. Shen, and J. W. Mark, "Enabling Multi-Hop Concurrent Transmissions in 60 GHz Wireless Personal Area Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, pp. 3824–3833, Nov. 2011.
- [35] J. Ning, T. Kim, S. Krishnamurthy, and C. Cordeiro, "Directional neighbor discovery in 60 GHz indoor wireless networks," *MSWiM*, p. 9, 2011.
- [36] G. Jakllari, W. Luo, and S. Krishnamurthy, "An Integrated Neighbor Discovery and MAC Protocol for Ad Hoc Networks Using Directional Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, pp. 1114–1024, Mar. 2007.
- [37] C. Cordeiro, "Evaluation of Medium Access Technologies for Next Generation Millimeter-Wave WLAN and WPAN," *Workshops, 2009. ICC Workshops 2009. IEEE*, 2009.
- [38] "ECMA-387-2010: High Rate 60 GHz PHY, MAC and PALs," December 2010.
- [39] "IEEE802.15.3c-2009: Amendment: Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension," October 2009.
- [40] "WirelessHD Specification Version 1.1 Overview," May 2010.
- [41] "IEEE802.11ad-2012: Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60GHz Band," 2012.
- [42] G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.
- [43] P. Chatzimisios, A. Boucouvalas, and V. Vitsas, "Performance analysis of IEEE 802.11 DCF in presence of transmission errors," *2004 IEEE International Conference on Communications (IEEE Cat. No.04CH37577)*, vol. 00, no. c, pp. 3854–3858 Vol.7, 2004.
- [44] X. Zhu, A. Doufexi, and T. Kocak, "Throughput and Coverage Performance for IEEE 802.11ad Millimeter-Wave WPANs," *Computer Engineering*, pp. 5–9, 2012.
- [45] E. Perahia and M. X. Gong, "Gigabit wireless LANs: an overview of IEEE 802.11 ac and 802.11 ad," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and ...*, no. November 2011, pp. 23–33, 2011.
- [46] H. Singh, X. Qin, H.-R. Shao, C. Ngo, C. Y. Kwon, and S. S. Kim, "Support of Uncompressed Video Streaming Over 60GHz Wireless Networks," *2008 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pp. 243–248, 2008.
- [47] X. Zhu, A. Doufexi, and T. Kocak, "On the performance of IEEE 802.15.3c millimeter-wave WPANs: PHY and MAC," *2010 Wireless Advanced 2010*, pp. 1–6, June 2010.
- [48] B. Schneier, *Applied cryptography: protocols, algorithms, and source code in C*. john wiley & sons, 2007.
- [49] M. Piz, *Wideband OFDM System for Indoor Communication at 60 GHz*. Phd, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2010.

- [50] M. Petri, “Configurable, Modular and Scalable OFDM Baseband Processor for Data Rates up to 4 Gbps,” in *Proc. of IASTED International Conference on Wireless Communications*, (Calgary, AB, Canada), pp. 4–8, Actapress, 2011.
- [51] J. Luo, A. Kortke, and W. Keusgen, “Throughput maximization of a Hybrid Dynamic Frame Aggregation and Block-ACK scheme for 60 GHz high speed communications,” in *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2010 IEEE 21st International Symposium on*, pp. 1248–1253, IEEE, 2010.
- [52] “IEEE802.1Q-1998 - Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridge Local Area Networks,” March 2011.
- [53] M. Methfessel and K. Dombrowski, “Vertical optimization of data transmission for mobile wireless terminals,” *Wireless Communications*, no. December, pp. 36–43, 2002.
- [54] T. Li, Q. Ni, D. Malone, D. Leith, Y. Xiao, and T. Turletti, “Aggregation With Fragment Retransmission for Very High-Speed WLANs,” *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 17, pp. 591–604, Apr. 2009.
- [55] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, and P. Beming, *3G evolution: HSPA and LTE for mobile broadband*. Academic press, 2010.
- [56] R. F. Lin, L. Rong, Q. Xu, and Y. Du, “Throughput Analysis of Delayed Acknowledgement over 802.15.3 WPAN with Hybrid ARQ Retransmission,” *Electromagnetics*, pp. 357–361, 2009.
- [57] K.-T. Feng, Y.-Z. Huang, and J.-S. Lin, “Design of MAC-defined aggregated ARQ schemes for IEEE 802.11n networks,” *Wireless Networks*, vol. 17, pp. 685–699, Dec. 2010.
- [58] D. Kim, Y. Choi, S. Jin, K. Han, and S. Choi, “A MAC/PHY cross-layer design for efficient ARQ protocols,” *IEEE Communications Letters*, vol. 12, pp. 909–911, Dec. 2008.
- [59] Y. Katayama, C. Haymes, D. Nakano, T. Beukema, B. Floyd, S. Reynolds, U. Pfeiffer, B. Gaucher, and K. Schleupen, “2-Gbps Uncompressed HDTV Transmission over 60-GHz SiGe Radio Link,” *2007 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pp. 12–16, Jan. 2007.
- [60] J. Gilbert, C. Doan, S. Emami, and C. Shung, “A 4-Gbps uncompressed wireless HD A/V transceiver chipset,” *Micro, IEEE*, vol. 28, no. 2, pp. 56–64, 2008.
- [61] L. Rakotondrainibe and Y. Kokar, “60 GHz High Data Rate Wireless Communication System,” *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*, pp. 18–22, 2009.
- [62] A. Ariffin, Y. Lee, and M. Amiruddin, “The first millimeter-wave point-to-point wireless gigabit ethernet communication system at TMR&D,” *WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS*, vol. 8, no. 7, 2009.
- [63] T. Umaba, S. Kitazawa, A. Miura, H. Ohtsuki, M. Ueba, M. Azuma, A. Honda, and S. Shimizu, “Demonstration experiment of millimeter wave multi-gigabit wireless LAN system,” *2009 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT)*, pp. 28–31, Dec. 2009.

- [64] A. Tomkins, R. Aroca, and T. Yamamoto, “A zero-IF 60 GHz 65 nm CMOS transceiver with direct BPSK modulation demonstrating up to 6 Gb/s data rates over a 2 m wireless link,” *Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 8, pp. 2085–2099, 2009.
- [65] J. Lee, Y. Chen, and Y. Huang, “A Low-Power Low-Cost Fully-Integrated 60-GHz Transceiver System With OOK Modulation and On-Board Antenna Assembly,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 45, pp. 264–275, Feb. 2010.
- [66] <http://www.gigabeam.com> (zuletzt besucht im Juni 2014).
- [67] <http://www.sub10systems.com> (zuletzt besucht im Juni 2014).
- [68] <http://www.siklu.com> (zuletzt besucht im Juni 2014).
- [69] <http://www.vubiq.com> (zuletzt besucht im Juni 2014).
- [70] <http://www.athenawave.com> (zuletzt besucht im Juni 2014).
- [71] CERAGON, “Meet enhanced slas in packet microwave backhaul using bandwidth profiles,” tech. rep., CERAGON, 2012.
- [72] M. Piz, E. Grass, and M. Peter, “A simple OFDM physical layer for short-range high data rate transmission at 60 GHz,” in *OFDM-workshop TU Hamburg-Harburg*, pp. 303–307, 2006.
- [73] M. Krstic, M. Piz, M. Ehrig, and E. Grass, “OFDM Datapath Baseband Processor for 1 Gbps Datarate,” *Proceedings of IFIP/IEEE VLSI-SoC*, pp. 156–159, 2008.
- [74] M. Piz, M. Krstic, M. Ehrig, and E. Grass, “An OFDM baseband receiver for short-range communication at 60 GHz,” *2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 409–412, May 2009.
- [75] “ITU-T G.781: Synchronization layer functions,” September 2008.
- [76] “ITU-T G.8260: Definitions and terminology for synchronization in packet networks,” February 2012.
- [77] “ITU-T G.8261: Timing and synchronization aspects in packet network,” April 2008.
- [78] “ITU-T G.8262: Timing characteristics of a synchronous Ethernet equipment slave clock,” July 2010.
- [79] “ITU-T G.8264: Distribution of timing information through packet networks,” October 2008.
- [80] “ITU-T G.8265.1: Precision time protocol telecom profile for frequency synchronization,” October 2010.
- [81] “ITU-T G.8271: Time and phase synchronization aspects of packet networks,” February 2012.
- [82] “IEEE1588-2008: Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems,” July 2008.





Tabelle A.1: EASY-A OFDM-Basisbandprozessor: PHY-Datenraten

Modulation	Bytes per Symbol		PHY-Datenrate [MBit/s]			$10 \times \log_{10}(f_b/B)$ [dB]			
	CC	CC+RS	PHY	CC	CC+RS	CC	CC+RS	CC_S	CC_RS_S
BPSK-1/2	48	45	1295	648	607	-5,23	-5,51	-6,21	-6,62
BPSK-2/3	64	60	1295	863	809	-3,98	-4,26	-5,20	-5,60
BPSK-3/4	72	67	1295	971	910	-3,47	-3,75	-4,76	-5,20
QPSK-1/2	96	90	2590	1295	1214	-2,22	-2,50	-3,87	-4,14
QPSK-2/3	128	120	2590	1727	1619	-0,97	-1,25	-2,92	-3,26
QPSK-3/4	144	135	2590	1943	1821	-0,46	-0,74	-2,55	-2,92
16-QAM-1/2	192	180	5180	2590	2428	0,79	0,51	-1,74	-2,19
16-QAM-2/3	256	240	5180	3454	3237	2,04	1,76	-1,24	-1,50
16-QAM-3/4	288	270	5180	3885	3642	2,55	2,27	-0,96	-1,23

## A. Bilder, Tabellen und Algorithmen

Tabelle A.2: MAC-Protokoll: Variablen

Name	Abbr	Name	Abbr
Node	NODE	Payload length	FLEN
MAC Destination	DST	max packet length	PLEN
MAC Source	SRC	Retry flag	RF
Beacon number	BNR	RX_BUF_FREE	RXBF
Beacon period	BDUR	RX_BUF_USED	RXBU
Frame type	FT	TX_BUF_USED	TXBU
ACK type	AT	TX_BUF_FREE	TXBF
ACK Sequence start	SEQA	Schedule beacon number	SBN
ACK bit block length	ABVL	Timestamp	TS
Acknowledgement	ACKV	Schedule time offset	STO
Access mode	AM	Schedule duration	SDUR
BLK_REQ_CNT	BRQ	Schedule repeat	SREP
MAX_BLK_CNT	BRM	Schedule count	SCNT
MAX_FRAG_CNT	FGM	Schedule position	SPOS
SLOT_TICKS	SLT	Schedule valid	SVLD
Timestamp	TS_L/TS_H	Beam direction	BMDIR
Traffic ID/Stream	TID	Header Checksum	HCS
Master-Change-Ratio	MCR	ACK block cnt	ABLK

Tabelle A.3: MAC-Protokoll: Konstanten

FT	Val	AM	Val	AT	Val
Beacon	0	Polling	0	No-ACK	0
DATA	1	TDMA	1	Imm-ACK	1
FFU	2-15	Poll&TDMA	2	Del-ACK	2
		FFU	15-3	BLK-ACK	3

---

**Algorithmus 3** Erstellung der Slotbelegungsmatrix

---

**Voraussetzung:** Berechne Nachbarschaftsmatrix, Finde alle Wege, Finde unabhängige Gruppen, Berechne die Länge der Wege

**gegeben:** start\_knoten, Liste aller Knoten, Nachbarschaftsmatrix

1. Liste aller Knoten, die direkt vom start\_knoten erreicht werden
  2. Liste aller Routen vom start\_knoten zu Endknoten
  3. Liste aller Endknoten ohne start\_knoten
  4. für alle Endknoten
    - a) Ermittle Länge der Routen mit Endknoten
    - b) Ermittle kürzeste Route(n) zum Endknoten => Länge beschreibt die benötigten Slots für eine ausreichende Bandbreite
  5. solange noch Elemente in der Liste der kürzesten Routen zu Endknoten
    - a) Wähle alle Knoten im ersten Wegeabschnitt
    - b) für all diese Knoten: benötigte Slots ist die maximale Länge der dazugehörigen Routen
    - c) Belege Anzahl der benötigten Slots in Slotbelegungsmatrix
      - i. Suche freien Slot für Knoten (muss in beiden Richtungen frei sein!)
      - ii. Belege Positionen für ersten Knoten und nächsten Knoten im Wegeabschnitt in beide Richtungen
      - iii. Entferne ersten Knoten aus der Liste
      - iv. Reduzieren der Länge der Route um eins
  6. Füge Slotbelegungen für Querverbindungen hinzu (für Test in Beacon-Slot)
  7. Fülle freie Positionen der Slotbelegungsmatrix mit sinnvollen Strahlkonfigurationen (Alg.: 5)
  8. Test der Interferenzmatrix: Tausche Knoten slotweise
  9. Ableiten der Master-Slave-Rollenbelegungsmatrix aus der Slotbelegungsmatrix
  10. Berechne mögliche Blockierpfade aus der Blockiermatrix
  11. solange noch Elemente in der Liste der Blockierpfade
    - a) Markiere Blockierpfad in der Verbindungsmatrix (entferne Verbindung)
    - b) Berechne Slotkonfiguration und die Rollenbelegungsmatrix
-

---

**Algorithmus 4** Erstellung der Slotbelegungsmatrix V2

---

**Voraussetzung:** Berechne Nachbarschaftsmatrix, Finde alle Wege, Finde unabhängige Gruppen, Berechne die Länge der Wege, Slot\_anzahl  $\geq n_{slv}$

**gegeben:** start\_knoten, Liste aller Knoten, Nachbarschaftsmatrix

1. Liste aller Knoten, die direkt vom start\_knoten erreicht werden
  2. Liste aller Routen vom start\_knoten zu Endknoten
  3. Liste aller Endknoten ohne start\_knoten
  4. für alle Endknoten
    - a) Ermittle Länge der Routen mit Endknoten
    - b) Ermittle kürzeste Route(n) zum Endknoten  $\Rightarrow$  Länge beschreibt die benötigten Slots für eine ausreichende Bandbreite
  5. sortiere Liste mit Pfaden nach der Pfadlänge absteigend
  6. setze Startslotposition zu Null
  7. solange noch Elemente in der Liste der längsten Pfade
  8. Wähle nacheinander die Knotenpaare vom Master zum Endknoten
  9. Schleife über die Anzahl der Slotpositionen  $\rightarrow$  Schleifenindex ist auch Slotpositions-offset
    - a) Suche freie Slots für Knotenpaar (muss in beiden Richtungen frei sein!)
      - i. Belege Positionen für beide Knoten an aktueller Slotposition =  $\text{mod}(\text{Startslotposition} + \text{Startslotpositionsoffset}, n_{slv})$
      - ii. Master-Slave-Rollenverteilung: Knoten näher zum Master sind temporärer Master  $\rightarrow$  Belege Positionen in der Rollenbelegungsmatrix
      - iii. Inkrementiere die Startslotposition und breche ab  
Jeder Abschnitt (Hop) wird in nacheinander folgenden Slots bearbeitet, so dass ein Paket idealerweise in einer Beacon-Periode zum Endknoten transportiert wird.
  10. Füge Slotbelegungen für Querverbindungen hinzu (für Test in Beacon-Slot  $\rightarrow$  Beacons vom Master dürfen nicht für die Synchronisation benutzt werden)
  11. Fülle freie Positionen der Slotbelegungsmatrix mit sinnvollen Strahlkonfigurationen (Alg.: 5)
  12. Test der Interferenzmatrix: Tausche Knoten slotweise
  13. Berechne mögliche Blockierpfade aus der Blockiermatrix
  14. solange noch Elemente in der Liste der Blockierpfade
    - a) Markiere Blockierpfad in der Verbindungsmatrix (entferne Verbindung)
    - b) Berechne Slotkonfiguration und die Rollenbelegungsmatrix
-

---

**Algorithmus 5** Belegung der offenen Positionen der Slotbelegungsmatrix

---

**gegeben:** Slotbelegungsmatrix

1. für alle Zeilen der *Slotbelegungsmatrix*
    - a) wenn nur ein Element in der Zeile belegt, dann auf alle anderen Spaltenpositionen kopieren, sonst
    - b) gehe spaltenweise von links nach rechts-> nicht belegte Position wird mit dem nächsten belegten Element (geringste Spaltendistanz) aufgefüllt
    - c) die Änderungen sind gleichzeitig in der *Rollenbelegungsmatrix* auszuführen
-

---

**Algorithmus 6** Sendeleistungssteuerung mit Berücksichtigung der Paketfehlerrate

---

Bemerkung: Mit diesem Algorithmus kann die eigene Sendeleistung  $P_{TX}$  und die der Gegenstation gesteuert werden, da PER jeweils für beide Stationen berechnet werden kann.  $P_{TX}$  wird z.B. mit dem nächsten Beacon übertragen.

1. Sendeleistung  $P_{TX}$  aus Nachbarschaftssuche als Referenzwert übernehmen  
    LAST\_ACTION := NONE  
    LAST\_PER := aus Nachbarschaftssuche als Referenzwert übernehmen  
    REF\_PER := Referenz PER für gute Übertragungsbedingungen  
    PWR\_STEP := 1 dB
  2. beobachte Paketfehlerrate über einen bestimmten Zeitraum bzw. Anzahl Pakete  
    => Ergebnis: CURR\_PER  
    IF CURR\_PER > REF\_PER  
        IF LAST\_ACTION == INCREASE  
            IF CURR\_PER > LAST\_PER  
                 $P_{TX} := P_{TX} - PWR\_STEP$   
                LAST\_ACTION := DECREASE  
            ELSE  
                 $P_{TX} := P_{TX} + PWR\_STEP$   
            END  
        ELSE  
            IF CURR\_PER > LAST\_PER  
                 $P_{TX} := P_{TX} + PWR\_STEP$   
                LAST\_ACTION := INCREASE  
            ELSE  
                 $P_{TX} := P_{TX} - PWR\_STEP$   
            END  
        END  
    END  
    LAST\_PER := CURR\_PER  
END  
GOTO 2.
-

---

**Algorithmus 7** Sendeleistungssteuerung mit Berücksichtigung des RSSI

---

Bemerkung: Mit diesem Algorithmus wird die Sendeleistung  $P_{TX}$  der Gegenstation (Slave) gesteuert.  $P_{TX}$  wird z.B. mit dem nächsten Beacon übertragen.

1. Sendeleistung  $P_{TX}$  aus Nachbarschaftssuche als Referenzwert übernehmen  
REF\_RSSI := Referenz RSSI für gute Übertragungsbedingungen
  
  2. RSSI nach Paketempfang => Ergebnis: CURR\_RSSI  
 $P_{TX}$  wird direkt aus CURR\_RSSI und REF\_RSSI bestimmt.  
 $P_{TX}$  oder CURR\_RSSI kann dafür bis zur Übertragung an die Gegenstation gemittelt werden  
GOTO 2.
-

Tabelle A.4: Slotbelegung mit Blockierung

$\frac{Slot}{Node}$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	6	3	6	3	1	3	4	6
1					0			
2			3					
3		0	2	0	5	0		
4							0	
5					3			
6	0	7	0	7				0
7		6	8	6				
8			7					

(a) 0-2

$\frac{Slot}{Node}$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	4	6	2	6	1	2	4	6
1					0			
2			0	3		0		
3		4	5	2				
4	0	3					0	
5			3					
6		0	7	0	7			0
7			6	8	6			
8				7				

(b) 0-3

$\frac{Slot}{Node}$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	6	3	6	3	1	2	3	6
1					0			
2						0		
3		0	4	0	5		0	
4			3					
5					3			
6	0	7	0	7				0
7		6	8	6				
8			7					

(c) 0-4

$\frac{Slot}{Node}$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	4	6	4	6	4	1	4	6
1						0		
2			3					
3		4	2	4	5	4		
4	0	3	0	3	0	3	0	
5					3			
6		0	7	0	7			0
7			6	8	6			
8				7				

(d) 0-2 & 0-3

$\frac{Slot}{Node}$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	6	3	6	3	1	3	6	3
1					0			
2			3					
3		0	2	0	4	0	5	0
4					3			
5							3	
6	0	7	0	7			0	
7		6	8	6				
8			7					

(e) 0-2 & 0-4

$\frac{Slot}{Node}$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	2	6	2	6	2	1	2	6
1						0		
2	0	3	0	3	0	3	0	
3		2	4	2	5	2		
4			3					
5					3			
6		0	7	0	7			0
7			6	8	6			
8				7				

(f) 0-3 & 0-4





## B. Berechnungen und Simulationsergebnisse

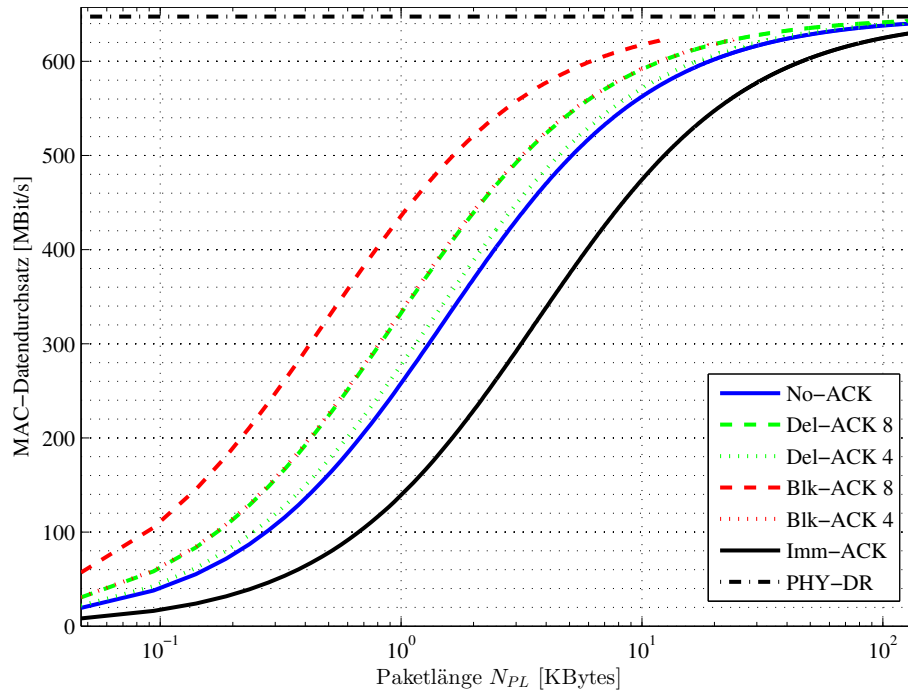


Abbildung B.1: MAC-Datendurchsatz BPSK-1/2

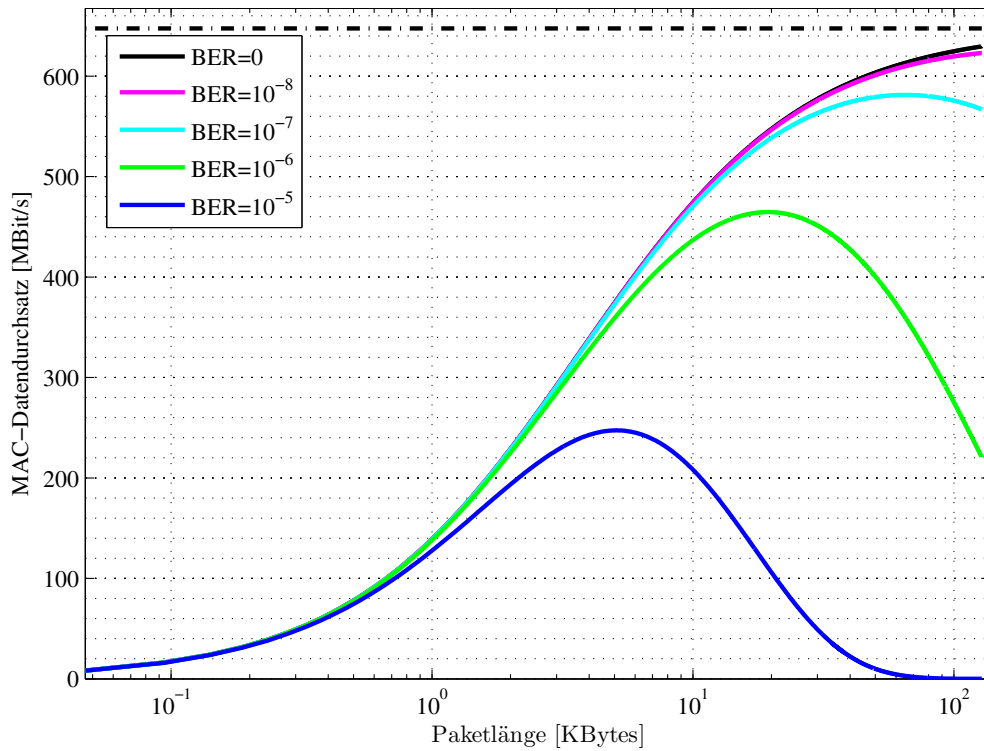


Abbildung B.2: MAC-Datendurchsatz Imm-ACK BPSK-1/2

## B. Berechnungen und Simulationsergebnisse

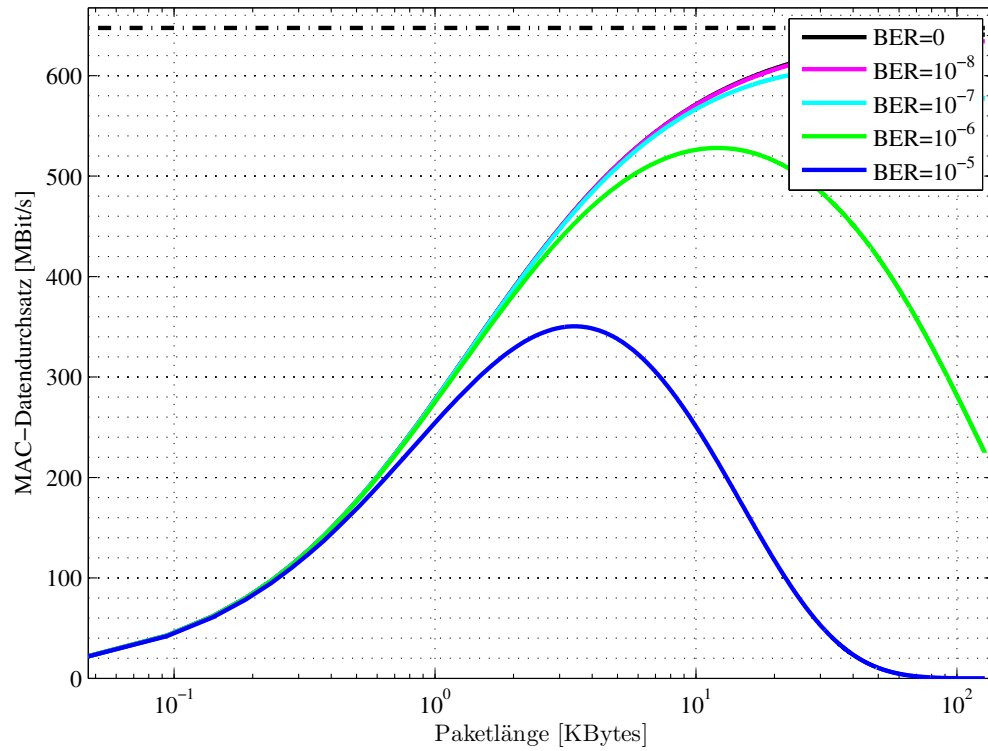


Abbildung B.3: MAC-Datendurchsatz Del-ACK 4 BPSK-1/2

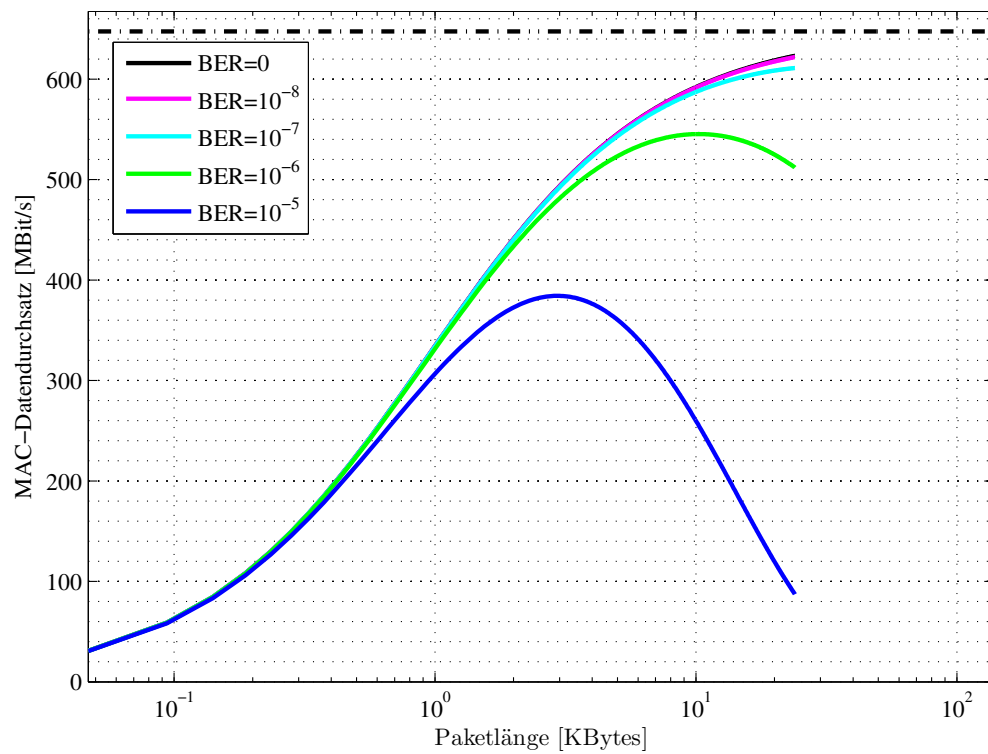


Abbildung B.4: MAC-Datendurchsatz Blk-ACK 4 BPSK-1/2

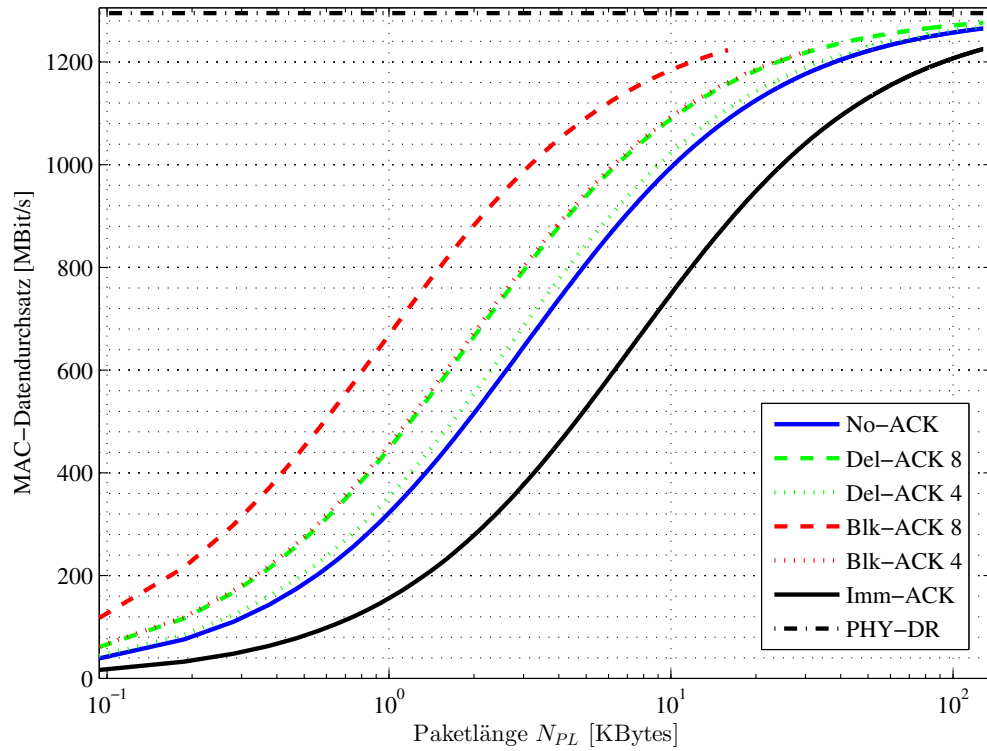


Abbildung B.5: MAC-Datendurchsatz QPSK-1/2

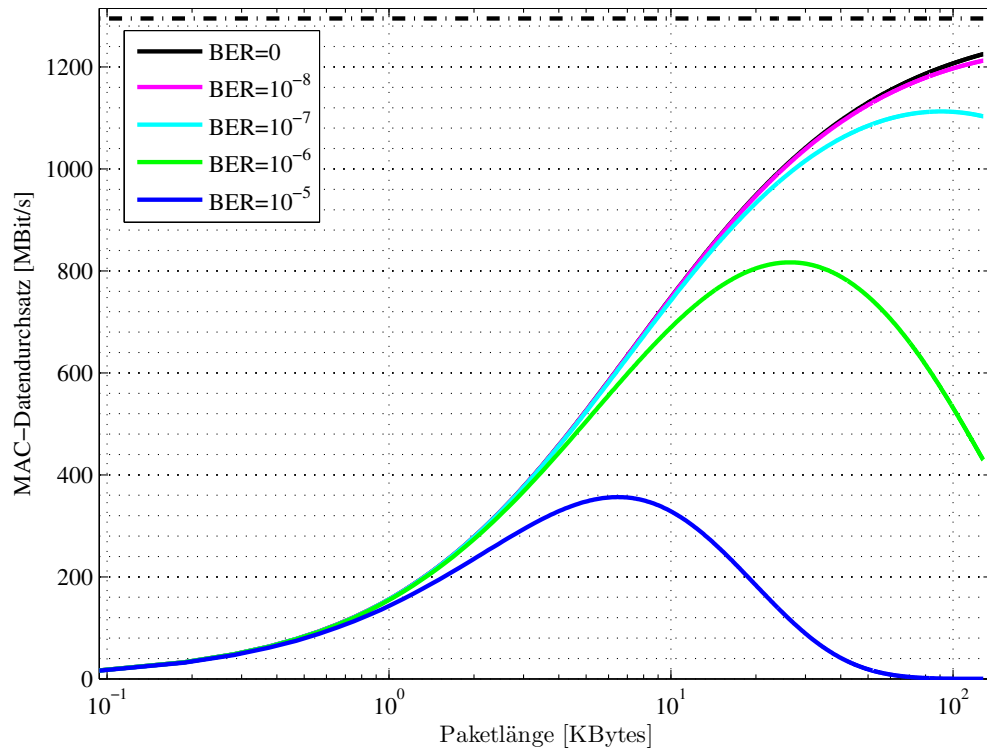


Abbildung B.6: MAC-Datendurchsatz Imm-ACK QPSK-1/2

## B. Berechnungen und Simulationsergebnisse

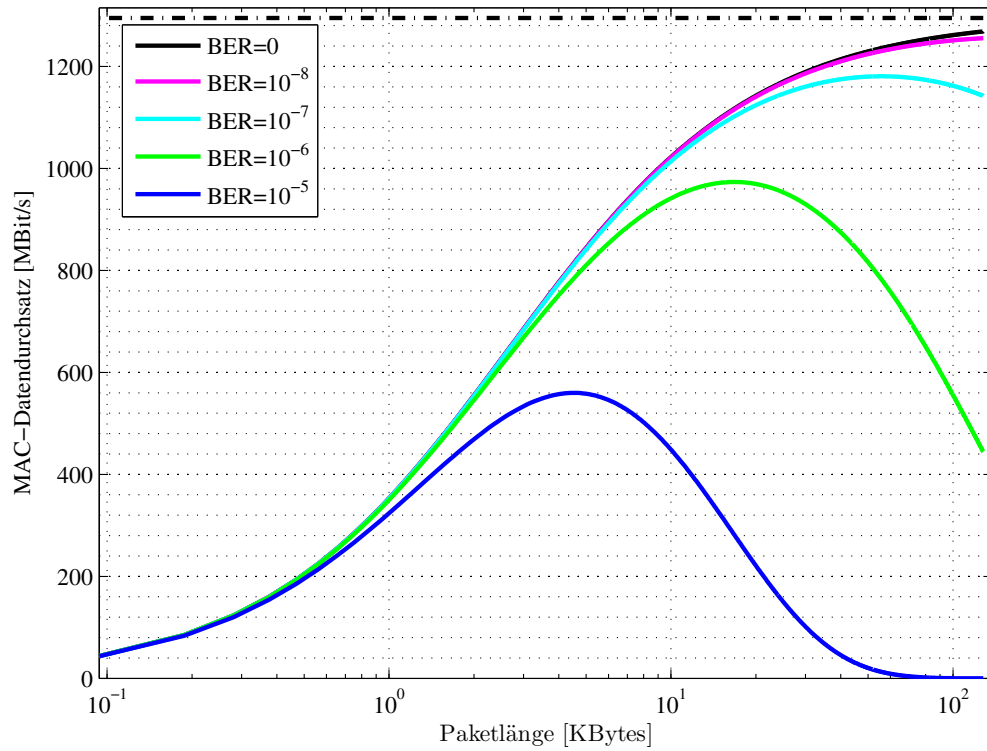


Abbildung B.7: MAC-Datendurchsatz Del-ACK 4 QPSK-1/2

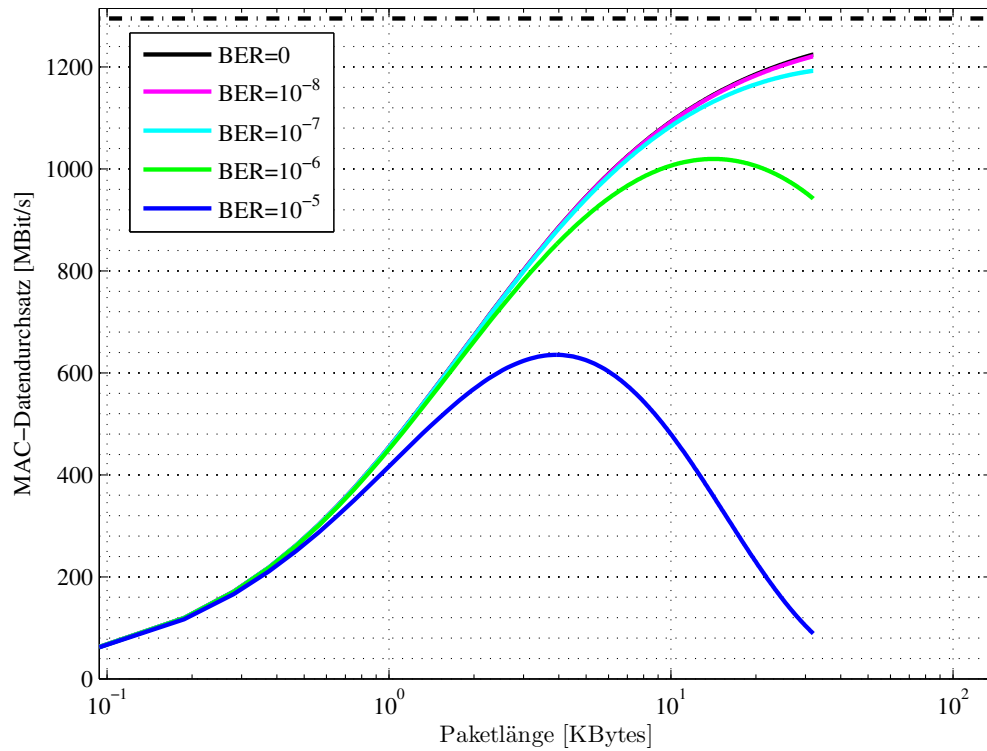


Abbildung B.8: MAC-Datendurchsatz Blk-ACK 4 QPSK-1/2

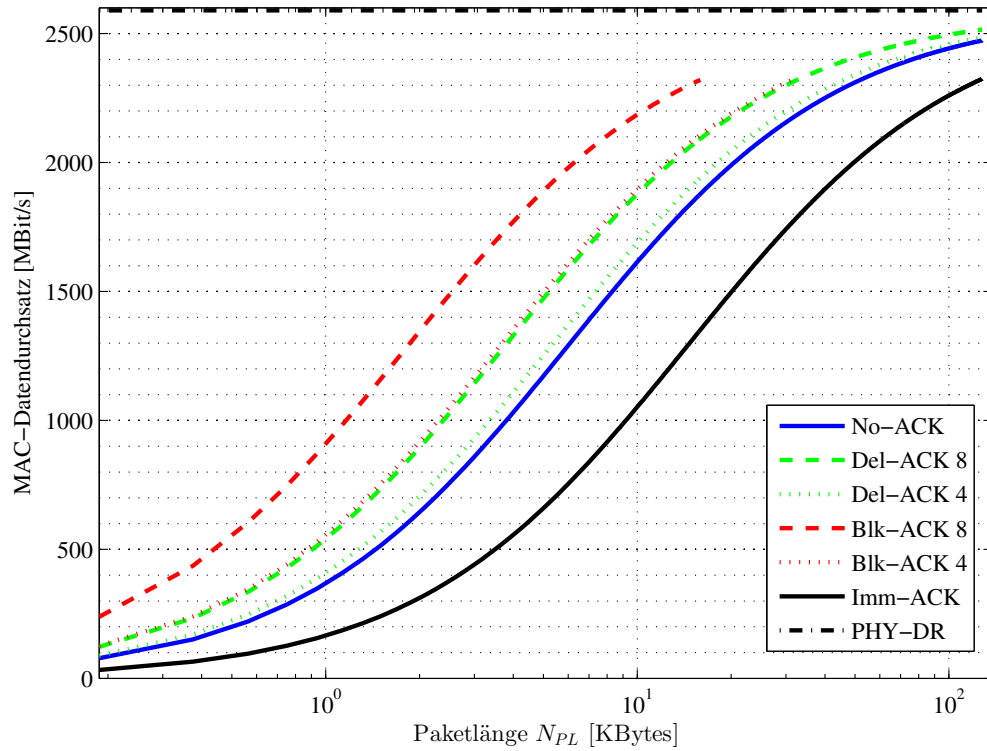


Abbildung B.9: MAC-Datendurchsatz 16-QAM-1/2

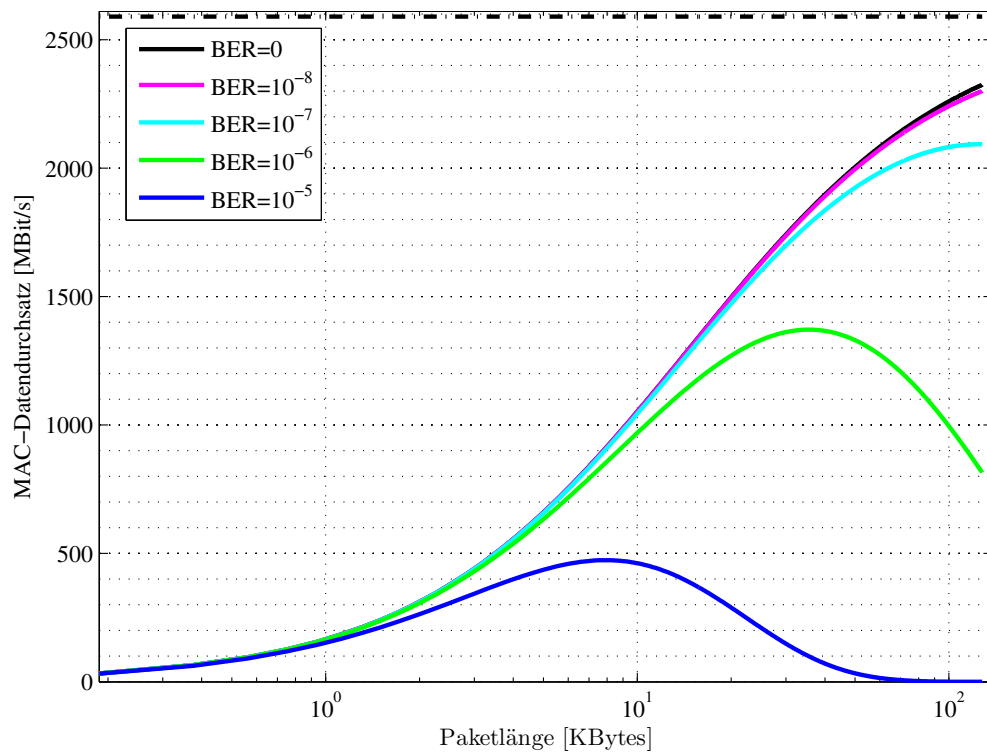


Abbildung B.10: MAC-Datendurchsatz Imm-ACK 16-QAM-1/2

## B. Berechnungen und Simulationsergebnisse

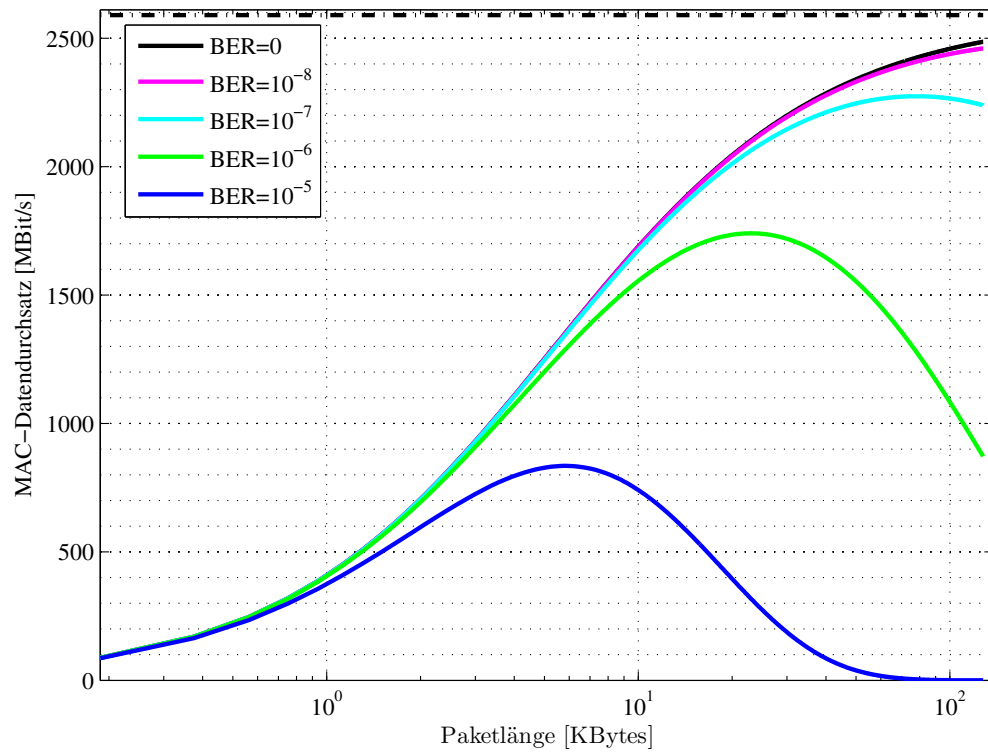


Abbildung B.11: MAC-Datendurchsatz Del-ACK 4 16-QAM-1/2

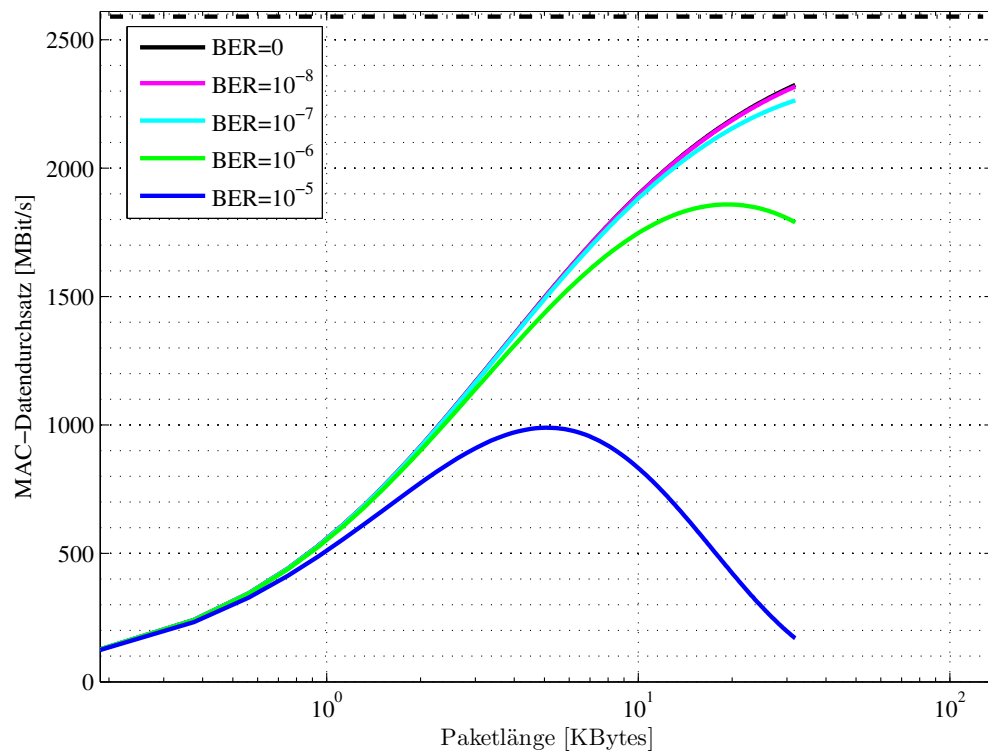


Abbildung B.12: MAC-Datendurchsatz Blk-ACK 4 16-QAM-1/2

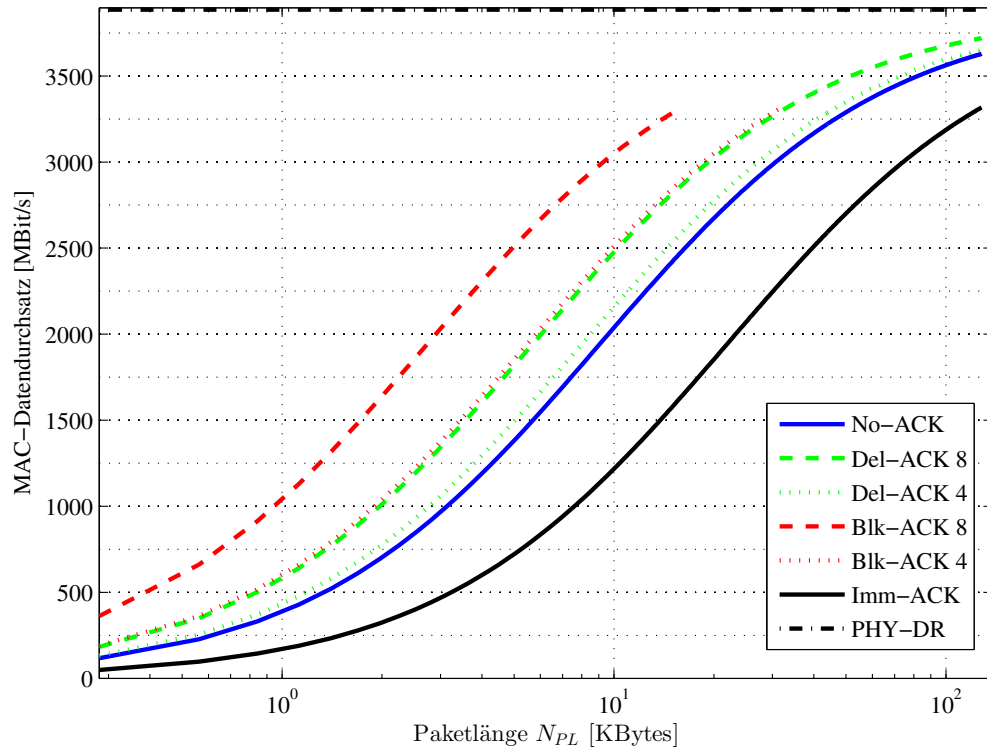


Abbildung B.13: MAC-Datendurchsatz 16-QAM-3/4

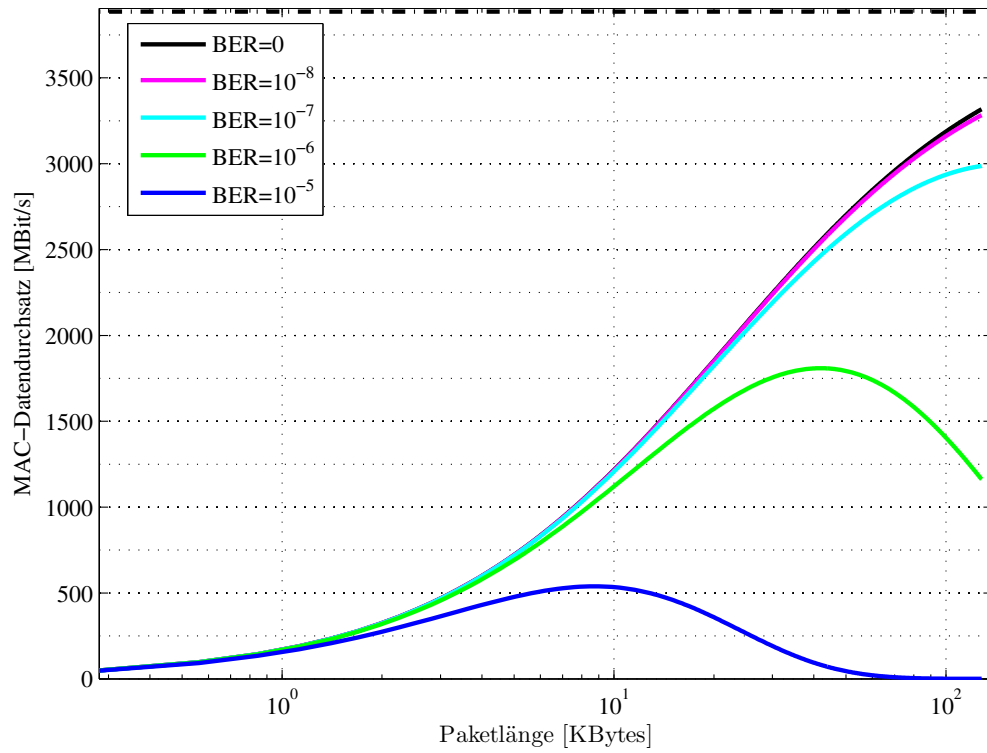


Abbildung B.14: MAC-Datendurchsatz Imm-ACK 16-QAM-3/4

## B. Berechnungen und Simulationsergebnisse

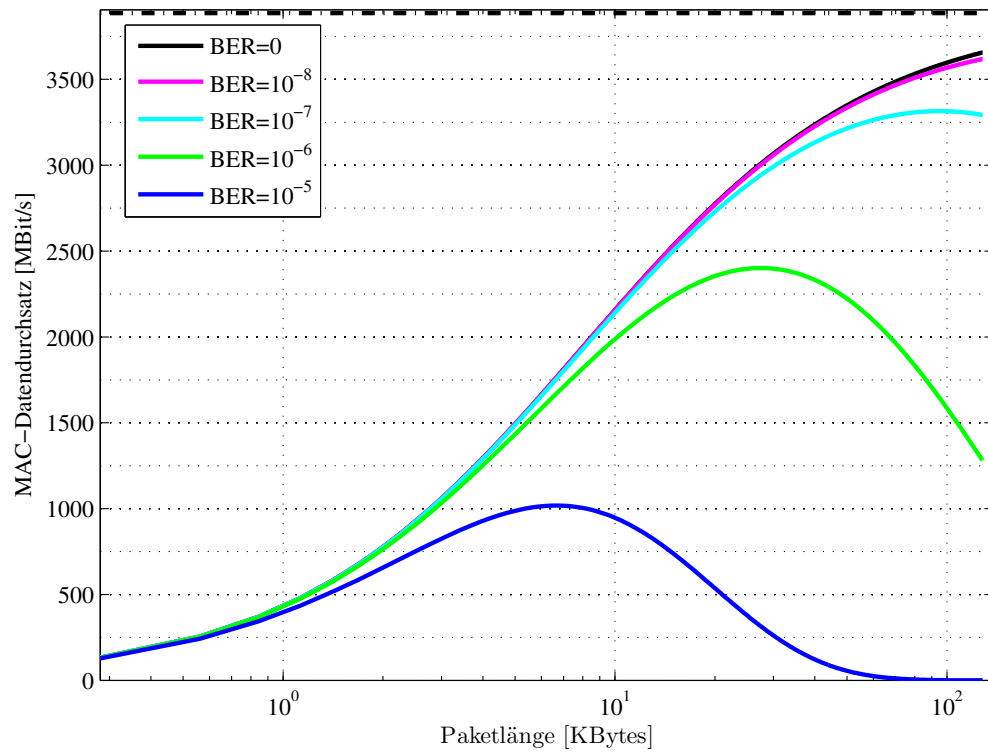


Abbildung B.15: MAC-Datendurchsatz Del-ACK 4 16-QAM-3/4

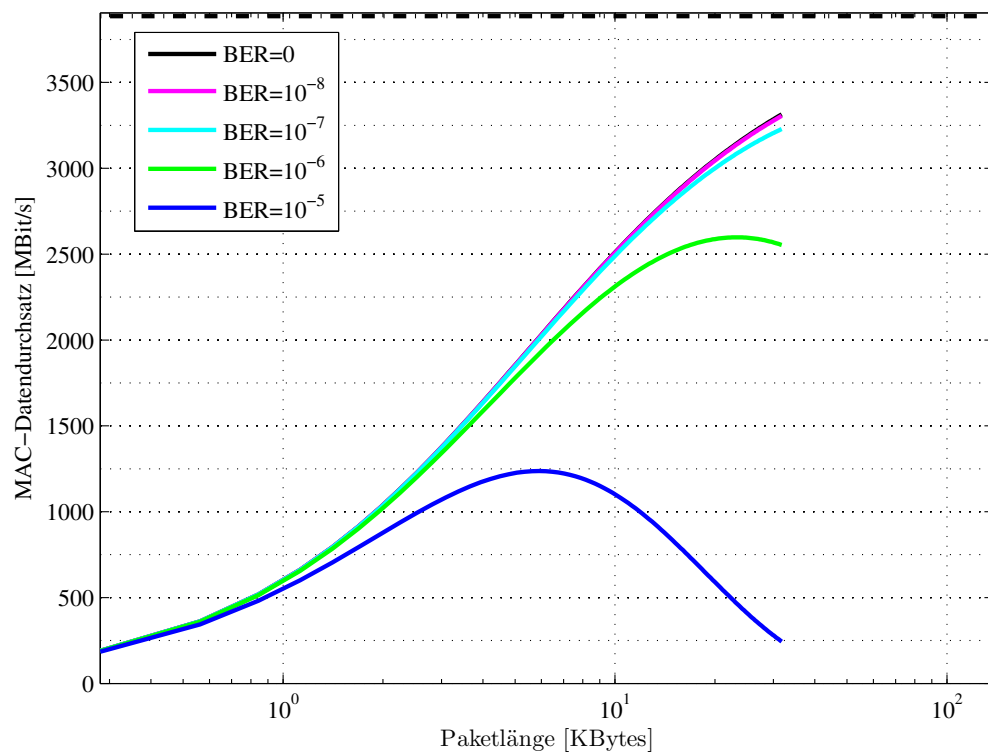


Abbildung B.16: MAC-Datendurchsatz Blk-ACK 4 16-QAM-3/4



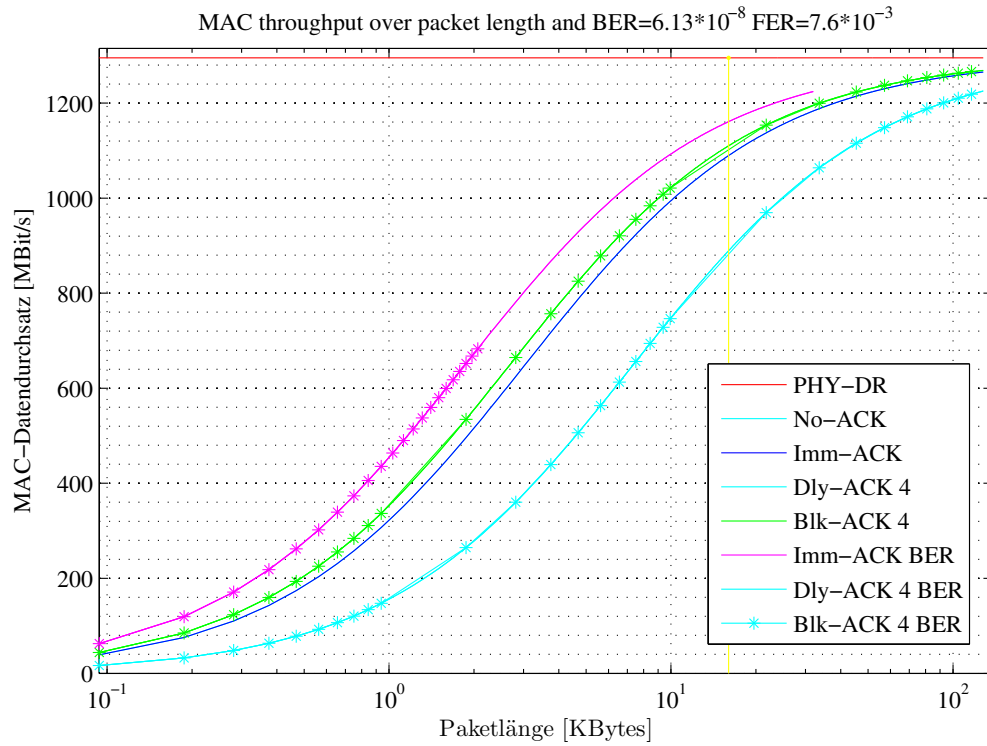
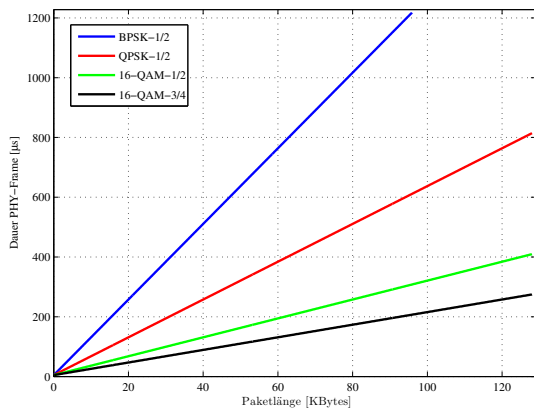
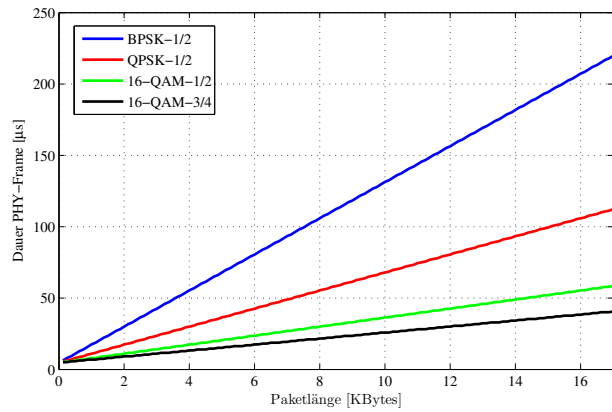


Abbildung B.17: MAC-Datendurchsatz bei einer PHY-Datenrate von 1,3 GBit/s bei einer  $BER = 6,13 \cdot 10^{-8} \hat{=} FER = 7,6 \cdot 10^{-3}$



(a) 0-128 KiB



(b) Auschnitt 0-16 KiB

Abbildung B.18: PHY-Framedauer



## C. Meßergebnisse

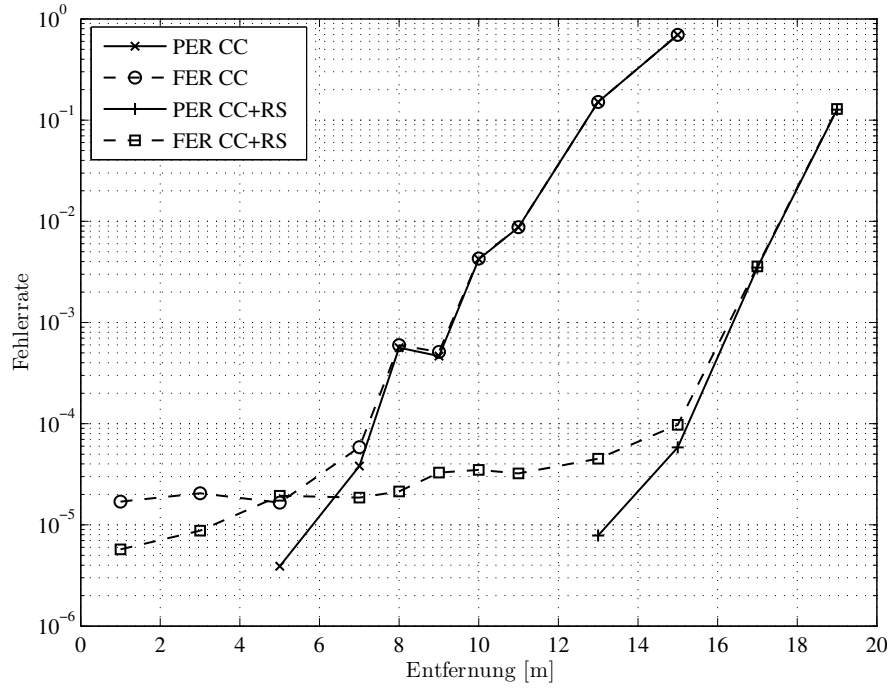


Abbildung C.1: QPSK-1/2  $N = 2048$  Bytes

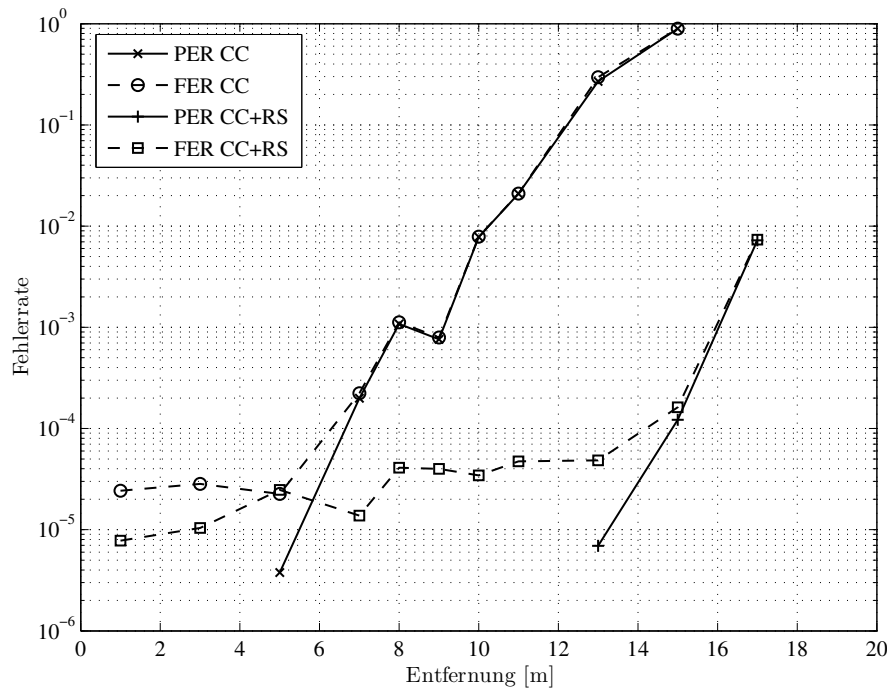


Abbildung C.2: QPSK-1/2  $N = 4096$  Bytes

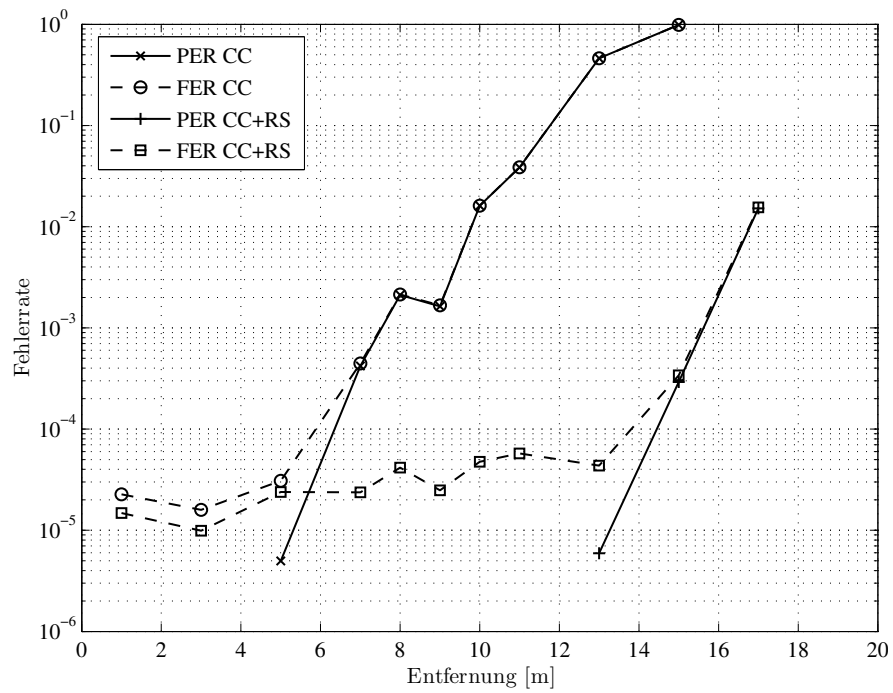


Abbildung C.3: QPSK-1/2  $N = 8192$  Bytes

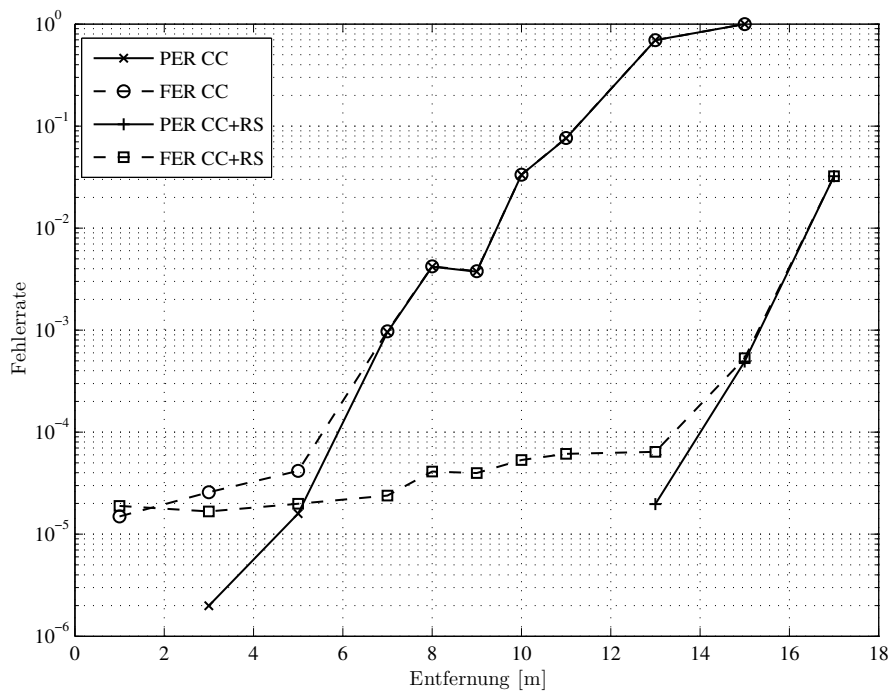


Abbildung C.4: QPSK-1/2  $N = 16384$  Bytes

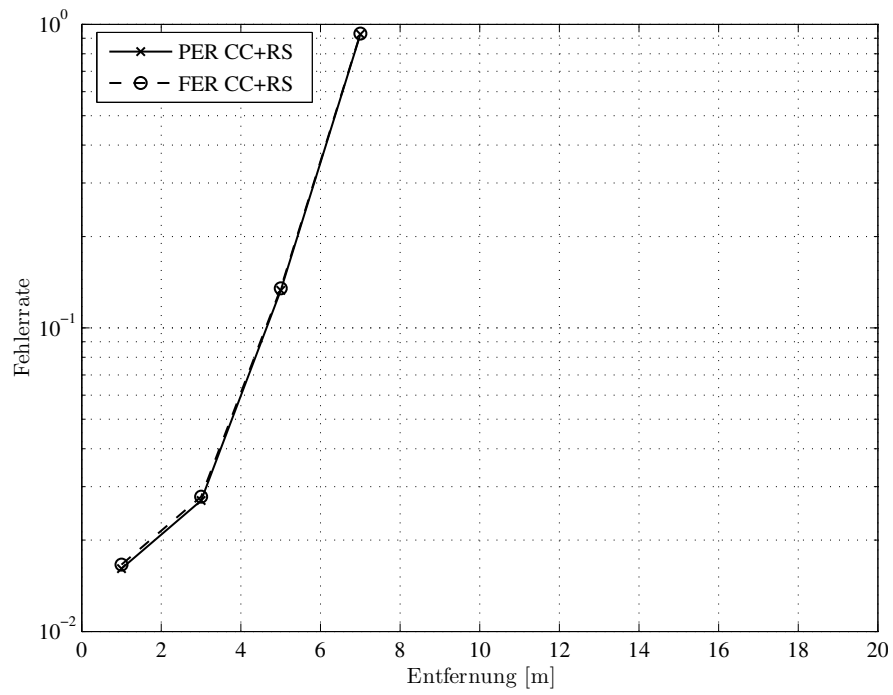


Abbildung C.5: 16-QAM-1/2  $N = 2048$  Bytes